

〔醸酵工学 第65巻 第3号 199-215. 1987〕

---

 総合論文
 

---

## 清酒醪のプロセス制御

(昭和61年度 日本醸酵工学会江田賞受賞)

杉本 芳範・藤田 栄信\*

菊正宗酒造株式会社

Process control of *saké* fermentation.—Monograph— YOSHINORI SUGIMOTO and EISHIN FUJITA\* (*Kiku-Masamune Saké Brewing Co., Ltd., Mikage, Higashinada-ku, Kobe 658, Japan*) *Hakkokogaku* 65: 199-215. 1987.

In recent years, considerable attention has been given to factory automation in *saké* brewing. A key to the achievement of this is how to automate the biological processes, *e.g.*, *moto* (seed mash) making, *koji* making, and *moromi* mashing (*saké* brewing), which have been conducted by skilled brew-masters.

This paper describes fundamental studies on a system for automatic control of the *moromi* mashing process. We investigated the kinetics of the mashing process which involves dissolution of solid materials, saccharification, yeast growth, and ethanol fermentation, and proposed rate equations for them. A simulation model of *moromi* mashing was constructed by integrating the equations of both the mass transfer and the biochemical reactions in the multiphase system of solid and liquid. Simulated results from the model agreed with data observed under various conditions. From simulation studies on a balance of the main three reactions in *moromi* mashing, *i.e.*, rice dissolution, saccharification, and ethanol fermentation, it was suggested that the process is divided into two phases, and that practical control is possible by merely monitoring the ethanol.

A system for adaptive control of *saké* mashing with the aid of a microcomputer was constructed. The temperature of the mash was controlled at the optimal value found in accordance with the recommended state by simulation of the process based on the model. The parameters of the model were successively adjusted for the best estimation by monitoring carbon dioxide evolution for estimation of the ethanol concentration. A test run of mashing in a pilot scale fermentor using 1,000 kg of polished rice showed a successful performance of the control system, and the quality of the *saké* produced was rated to be similar to that brewed in a conventional way.

清酒は精米、原料処理、製麴、酒母、醪など数多くのプロセスを経て醸造される。したがって、目標とする品質の清酒を醸造するには、各プロセスを熟知するとともに、プロセス間の関係を正確に把握し、さらに味や香りなど品質面を考慮しつつ管理を行ってゆく必要がある。今日まで杜氏がこの役割を担ってきたが、近年その後継者不足が深刻化しつつある。また、重労働を要する作業の機械化により工場が大型化し大量生

産が可能になった半面、<sup>1)</sup> 従来のように綿密な管理が行いにくくなっているのも実情である。

最近、計算機あるいは計算機と連動する制御機器の性能が比較的安価に入手できるようになったが、清酒醸造においても、これらの機器を用いて一連のプロセスを総合的、かつ、自動的に管理するシステムを導入すること (FA: Factory automation) により、品質面の管理を強化し、かつ省力化を図る試みがなされつつある。しかし、この FA を達成するためには、製品の

\* 昭和59年2月19日死去

品質に直結する製麴, 酒母, 醗など発酵プロセスの自動管理を確立せねばならない。

本論文は, 清酒醗プロセスにおいて, 計算機を援用する自動管理システムの開発に関する一連の研究結果をまとめたものである。

### 1. 清酒醗の反応特性と数式化

計算機を利用して制御を行うには, プロセス状態を数値的に表現し, 初期条件や操作量を変えた場合にプロセスの状態がどのように変化するかを模擬(シミュレーション)できるような数式(状態方程式)を導くことが必要である。<sup>2)</sup>

醗プロセスは原料デンプンの液化, 糖化と酵母のアルコール発酵が同一容器内で同時に行われる「併行複発酵」と呼ばれる独特の反応系を有するものであり, 本研究では個々の反応, すなわち原料米の溶解,<sup>3,4)</sup> 糖化,<sup>5)</sup> 酵母の増殖とアルコール発酵<sup>6)</sup> について速度論的解析を行い, 重要な操作変数である温度の影響を組み入れた状態方程式を導いた。

**蒸米の溶解<sup>3)</sup>** 三吉, 照井<sup>7)</sup> は蒸米を, 永谷<sup>8)</sup> は $\alpha$ 米を用いて汲み水歩合<sup>9)</sup> を実際より数倍大きくした溶解実験を行い, 蒸米溶解の基礎的な速度式を導き, 布川, 合瀬<sup>10)</sup> は併行複発酵系でこの式の適合性を検討し, 仕込み初期を除き適合性が認められたと報告している。しかし, 実際の蒸米溶解はこれらの研究より低い汲み水歩合で行われ, 固体基質である蒸米は吸水, 膨潤, あるいは溶解することにより大きな状態変化が観察される。鼓<sup>11)</sup> はこの点を考慮し, 蒸米溶解を「酵素的溶解」と「物質的溶解」に区別して検討しているが, 溶解の数式化は行っていない。そこで, 実用的な汲み水歩合である135%を基準として蒸米溶解反応を解析し, 数式化を行った。

蒸米溶解に及ぼす汲み水歩合の影響を, 酵母の存在しない酵素反応系で検討した結果を Fig. 1 に示したが, 12日目の溶解率は汲み水歩合が小さくなるにしたがって低下し, 汲み水歩合が蒸米溶解に強く影響することが明らかとなった。したがって, 実際より数倍大きな汲み水歩合で求められた従来の溶解速度式<sup>7,8,10,12-14)</sup> は, そのまま実プロセスに適用できないと考えるべきであろう。

Fig. 1 の結果から, 灘地区の平均的な汲み水歩合である125~135%では, 12日目の溶解率が40~50%となっている。しかし, アルコール発酵を伴う実際の醸造では12日間で原料米の8割程度が溶解することが知ら

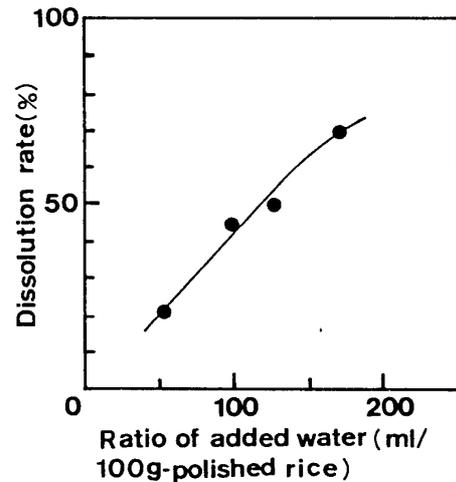


Fig. 1. Effects of the ratio of added water (Kumimizu-buai) on dissolution of substances from steamed rice.

Acetate buffer (0.1 M) containing  $\alpha$ -amylase (100 units/ml from *B. subtilis*) was used for incubation for 12 days at 16°C.

れており, 原料米の約3/4を占める蒸米においても同程度の溶解が見込まれる。したがって, Fig. 1 の実験結果と実プロセスにおける溶解率の差はアルコール発酵に起因すると推察される。そこで汲み水歩合135%で,  $\alpha$ -アミラーゼ100 units/mlを含む0.1 Mの酢酸緩衝液を用いて, 16°C 3日間保って蒸米を溶解させ, 溶解が停止した時点で遠心分離により未溶解残渣を分離した後, (1)液相量, (2)グルコース濃度, (3)かく

Table 1. Correlation between several factors and dissolution rate in a non-fermentation system.

Factors	Correlation coefficient
Glucose concentration	-0.884*
Volume of liquid phase	0.310*
Agitation	-0.017

\* Significant with 99% confidence by T-test.

Reaction mixture was prepared as shown in Fig. 3. Incubation: 60 h at 16°C. After removing liquid by centrifugation, a glucose solution at each concentration was added to the residue under the following conditions, and mixtures were incubated for 7 days at 16°C.

Operations: glucose concentration, 0, 150, 300 (g/l); volume of the acetate buffer added, 0, 30, 50 ml; agitation, 0, 1, 3 (times/d). All combinations were examined.

拌の3因子を各3段階とする全組み合わせで未溶解残渣を再度16°Cにて溶解させ、7日目の溶解率と上記3因子の相関係数を検定することにより、溶解を抑制する主原因について検討した。その結果、Table 1に示すように、7日目の溶解率はグルコース濃度と最も強い負の相関関係を示し、グルコース濃度が高くなることにより溶解が抑制される傾向が認められた。

この溶解抑制を数式化するため、醪中の糖のほとんどを占めるグルコースによる $\alpha$ -アミラーゼ反応の阻害を考え、*Bacillus subtilis*, *Aspergillus oryzae* 両起源の $\alpha$ -アミラーゼについて反応阻害を検討した。その結果、Fig. 2に示すように、両酵素反応は高濃度のグルコースで強く阻害された。<sup>15)</sup> また、実際の醪でグルコースから発酵により生成されるエタノールによっても阻害が生じたが、グルコースより阻害は弱く、この傾向は*A. oryzae* 起源の $\alpha$ -アミラーゼにおいて顕著であった。

汲み水歩合135%、 $\alpha$ -アミラーゼ濃度、温度、反応時間をそれぞれ0~1,000 units/ml, 4~40°C, 5~150hの範囲で種々に変えて、溶解程度の異なる蒸米醪を調製し、溶解率と液相量、および溶解率と全糖濃度の関係を検討した。その結果、Fig. 3に示すように液相量は溶解率と強く相関して増加したが、全糖濃度は溶解率が低くても高い値となり、溶解の進行に伴う変化は小さい。したがって、実際の汲み水歩合における蒸米溶解率を推定するには液相量を考慮する必要があり、全糖濃度のみからの推定は不正確になり易いと考えられる。

一般に、清酒醪中の蒸米溶解は発酵など他の反応の影響を受けず仕込み初期に速やかに進むため、厳密な

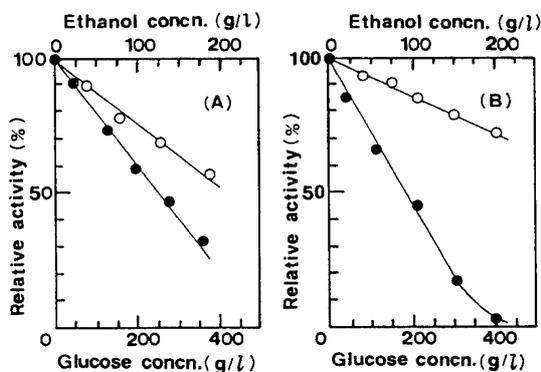


Fig. 2. Inhibition of  $\alpha$ -amylase by glucose and ethanol.

(A),  $\alpha$ -amylase from *B. subtilis*; (B), from *A. oryzae*: ●, by glucose; ○, by ethanol

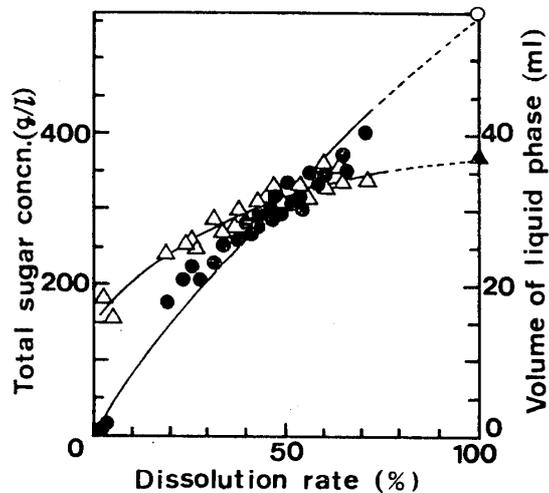


Fig. 3. Release of total sugar from steamed rice and the increase of liquid phase volume as a function of dissolution rate.

Acetate buffer containing  $\alpha$ -amylase, 29.4 ml (0.1 M, pH 5.0) was added to 30 g of steamed rice.  $\Delta$ , total sugar concentration; ●, volume of liquid phase;  $\blacktriangle$ ,  $\circ$ , total sugar concentration and volume of liquid phase at complete dissolution, respectively.

意味の併行複発酵はグルコース生成とアルコール発酵の両反応を考えればよいと言われている。<sup>16)</sup> しかし、本研究により、蒸米の溶けはアルコール発酵により促進されることが明らかとなり、その管理にはアルコール発酵の状態も考慮に入れる必要があると考えられる。

以上得られた知見をもとに、蒸米溶解速度式(1)式を誘導した。 $n$ の値は*B. subtilis* 起源の $\alpha$ -アミラーゼで0.66、*A. oryzae* 起源のもので0.35である。

$$\begin{aligned} -d(S/S_0)/dt \\ = 19.5 \times 10^{11} \cdot E_1^n \cdot \exp(-9260/T)(S/S_0) \\ 281^\circ\text{K} \leq T \leq 293^\circ\text{K} \end{aligned} \quad (1)$$

$S$ は溶解基質残存量(g)、 $S_0$ は $S$ の初期値、 $E_1$ は $\alpha$ -アミラーゼ濃度(unit/ml)、 $T$ は反応温度である。また、溶解時の液相量 $V(l)$ は(2)式で、全糖濃度 $C_t$ (g/l)は(3)式で表した。

$$V = V_0 + (1 - S/S_0)(V_t - V_0) + j \cdot r(S_0 - S) \quad (2)$$

$$C_t = r(S_0 - S)/V \quad (3)$$

$V_0$ は $V$ の初期値、 $V_t$ は反応系の全水分量、 $j$ はグルコースの溶解に伴う液量増加率、 $r$ はデンプンからグルコースへの変換率である。また、グルコースによる溶解阻害係数 $C_{ig}$ 、およびアルコールによる阻害係数

Table 2. Inhibition factors of glucose and of ethanol for dissolution of steamed rice.

	$\alpha$ -Amylase from <i>B. subtilis</i>	$\alpha$ -Amylase from <i>A. oryzae</i>
$C_{ig}$	$1-0.0022 \cdot G$	$1-0.0030 \cdot G$
$C_{ie}$	$1-0.0024 \cdot E_t$	$1-0.0016 \cdot E_t$

Inhibition factors,  $C_{ig}$  and  $C_{ie}$  were estimated from the experimental results in Fig. 2.  $C_{ig}$ , inhibition factor of glucose;  $C_{ie}$ , inhibition factor of ethanol;  $G$ , glucose concentration (g/l);  $E_t$ , ethanol concentration (g/l).

$C_{ie}$  を Fig. 2 より Table 2 のように決定した。

以上の (1)–(3) 式ならびに、溶解阻害係数から Runge-Kutta 法を用いる数値計算により蒸米溶解率の経時変化を推定した結果、Fig. 4 に示すように各温度の発酵系、無発酵系において溶解率および全糖濃度の実測値は計算値と良好な一致を示した。

**麴の溶解**<sup>4)</sup> 麴は醗の溶け、糖化などを進める各種酵素の供給源である一方、重要な副原料でもある。酵素源としての役割については現在までに数多くの研究<sup>17,18)</sup> が報告されているが、麴を原料、すなわち溶

解基質として取り扱った研究はわずかに鼓<sup>19)</sup>の報告しかなく、その報告においても溶解反応の数式化は行われていない。

Fig. 5 には、麴と蒸米の溶解率経時変化を無発酵系において比較した結果を示した。麴は初期に30~40%まで急速に溶解した後、溶解速度が著しく低下し、12日目の溶解率は蒸米より20~30%低い。したがって、麴の溶解には蒸米溶解速度式を直接適用できず、新たに式設定する必要がある。

Fig. 6 には、任意に選択した25点の麴および蒸米の成分組成を平均値で比較した結果を示した。麴には仕込み水の添加により急速に溶出する糖が存在し、その量は麴に含まれる全ての糖質量の約30%に相当する。<sup>20)</sup> また、麴中の全糖質量に対するこの溶出糖の割合は、麴を 15°C で1日間溶解させた場合の溶解率と強い相関関係を示した (相関係数=0.937)。

*A. oryzae* の  $\alpha$ -アミラーゼは pH 4.0 以下で著しく活性が低下し、pH 2.0 ではほとんど活性が認められない。<sup>21)</sup> pH 2.0~5.0 における麴溶解の経時変化を Fig. 7 に示したが、pH 2.0 では1日間で溶解が停止し、停止時の溶解率は約30%に留まった。また、その後 pH を 4.0 に変化させても溶解は進行せず、反応る液

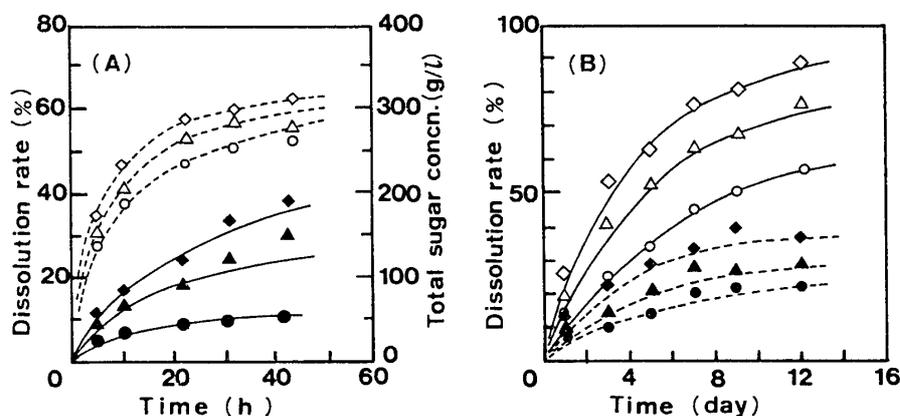


Fig. 4. Simulated results in the dissolution of steamed rice. Lines are simulated curves. Symbols are observed values.

(A): Fifteen g of steamed rice was added to 14.7 ml of 0.1 M acetate buffer (pH 5.0) containing  $\alpha$ -amylase from *B. subtilis*. Solid lines: dissolution rate; Broken lines: total sugar concentration: ●, ○,  $\alpha$ -amylase 10 units/ml; ▲, △, 50 units/ml; ◆, ◇, 100 units/ml.

(B): *Koji* was used as the  $\alpha$ -amylase source. Thirty ml of salt solution containing 14 mg of  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  and 2.7 mg of  $\text{NaCl}$  were added to the mixture of steamed rice (23.4 g) and *koji* (6.6 g). In the fermentation system (solid lines), *saké* yeast (Kyokai no. 601) was inoculated at  $10^7$  cells/ml added water, and 0.5 ml of toluene was added in the non-fermentation system (broken lines). ●, ○, incubated at 8°C; ▲, △, 12°C; ◆, ◇, 16°C.

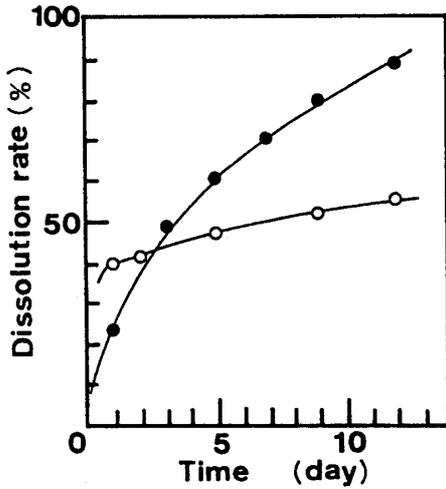


Fig. 5. Dissolution patterns of *koji* and steamed rice.

Ten g of steamed rice was added to 50 ml of 0.1 M acetate buffer (pH 5.0) containing  $\alpha$ -amylase (150 units/ml) and glucoamylase (40 units/ml). Ten g of *koji* was added to 50 ml of 0.1 M acetate buffer pH 5.0). Both of the mixtures were incubated at 15°C. Steamed rice and *koji* prepared with "Nihonbare" rice. ●, steamed rice; ○, *koji*.

中には  $\alpha$ -アミラーゼ活性の存在しないことが確認された。これに対し, pH 4.0, pH 5.0 では 2 日目以降も溶解が進行し, ろ液中には 100 units/ml 以上の  $\alpha$ -アミラーゼ活性が認められた。これらの結果から, 麴には大別して 2 種類の溶解基質, すなわち,

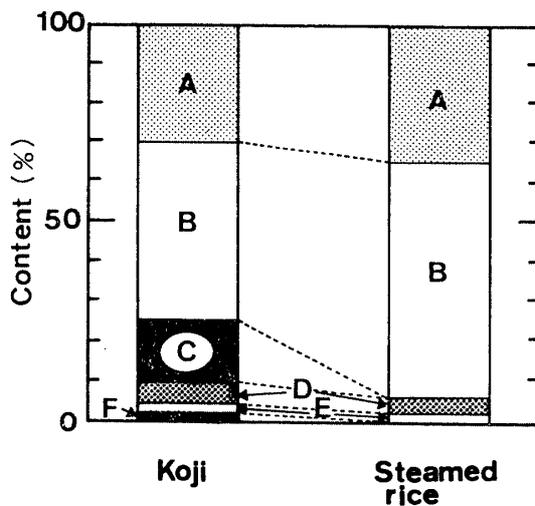


Fig. 6. Main components of *koji* and steamed rice. A, water; B, starch; C, soluble sugar; D, nitrogen components; E, residue; F, microbial cells.

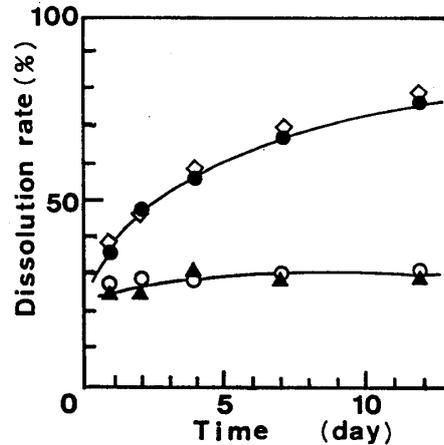


Fig. 7. Variation of *koji* dissolution with pH.

Ten g of *koji* was added to 50 ml of acetate (acetate-HCl) buffer at each pH, and incubated at 15°C. ○, pH 2.0; ▲, pH 2.0 for 1 day then pH 4.0; ●, pH 4.0; ◇, pH 5.0.

(1)  $\alpha$ -アミラーゼの作用なしに初期に速やかに溶出する基質 (SQ)

(2)  $\alpha$ -アミラーゼ反応により溶解する基質 (SS)

が存在することが明らかとなり, 麴の溶解速度式は SQ, SS 両基質について設定する必要がある。またこのように溶解特性の異なる 2 種類の基質が生じる原因は, 麴の原料である蒸米が製麴工程において溶解性を増大, ならびに低下させる 2 種類の作用, すなわち, 麴菌体の増殖時に分泌される加水分解酵素による蒸米デンプンの低分子化と, 35~40°C, 40時間以上の気中放置による蒸米の老化<sup>22,23)</sup> を同時に受けるためと推察される。

以上の知見をもとに, (4)–(6)式のように麴の溶解速度式を設定した。

$$-d(S/S_0)/dt = V_q \cdot (S_{q0}/S_0) + V_s \cdot (1 - S_{q0}/S_0) \quad (4)$$

$$V_q = 1.4 \times 10^{14} \cdot \exp(-9270/T) \cdot (S_q/S_{q0}) \quad (5)$$

281K ≤ T ≤ 293K

$$V_s = K_{dx} \cdot E_1^{0.39} \cdot \exp(-6650/T) \cdot (S_s/S_{s0}) \quad (6)$$

281K ≤ T ≤ 303K

$V_q, V_s$  はそれぞれ SQ, SS の溶解速度,  $S$  は麴の基質残存量,  $S_q, S_s$  はそれぞれ SQ, SS の基質残存量 (g),  $S_{q0}, S_{s0}$  は  $S_q, S_s$  の初期値である。また, 麴溶解時の液相量  $V$  を(7)式で表現した。

$$V = V_a + R \cdot (1.23 \cdot (1 - S/S_0)^{1.32} - 0.5) \quad (7)$$

$V_a$  は汲水量,  $R$  は麴重量である。

Table 3. Effects of the variety of rice grains on *koji* dissolution.

Variety	W. cont	$\alpha$ -Aase	GAase	APase	$S_{q0}/S_0$	$K_{dx}$
Nihonbare	31.7	979	169	2647	34.1	0.50
Gohyakumangoku	32.4	727	124	2397	31.2	0.89
Aokei-79go	33.1	949	173	2519	29.4	0.88
Nadahikari	30.0	945	158	2647	36.7	1.08
Hyokeyi-36go	29.3	868	145	2664	34.2	1.35
Hyokeyi-37go	29.4	935	169	2703	37.6	1.24
Hyokeyi-18go	31.2	981	172	2705	31.2	1.40
Fukunohana	33.5	846	170	2636	30.1	1.15
Yamadanishiki	33.4	781	152	2413	33.0	1.57

W. cont, water content (%);  $\alpha$ -Aase,  $\alpha$ -amylase activity (units/g *koji*); GAase, glucoamylase activity; APase, acid protease activity; *Koji* was prepared by the standard method on a practical scale.

麴には原料として酒造に特に適した米が用いられる。<sup>24,25)</sup> そこで原料米品種と麴溶解の関連性について検討した結果を Table 3 に示した。水分、各種酵素活性、SQ の含有率などには、使用する原料米品種による差が認められないのに対し、SS の溶解速度定数  $K_{dx}$  は品種毎に大きく異なり、溶解反応をシミュレートするには品種に応じて  $K_{dx}$  値の補正が必要である。

以上得られた(4)–(7)式を用いて麴の溶解率経時変

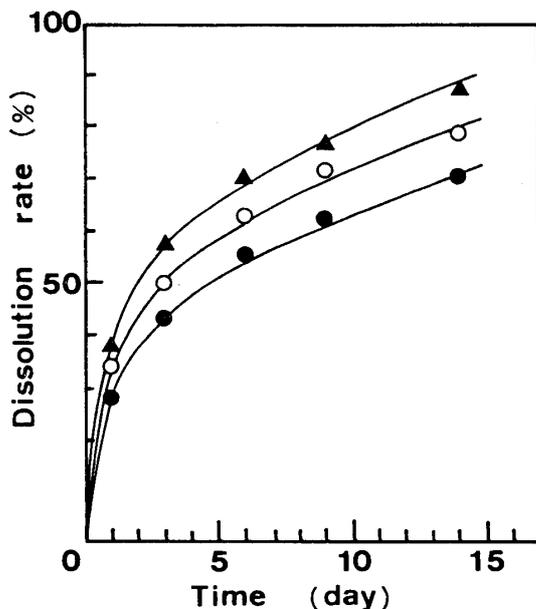


Fig. 8. Simulated results of dissolution of *koji*. *Koji* was made with "Yamadanishiki" rice (72% polished). The reaction mixture is described in Fig. 5. ●, 5°C; ○, 10°C; ▲, 15°C.

化を推定した結果, Fig. 8 に示すように各温度で実測値と計算値は良好に一致した。

グルコース生成<sup>25)</sup> 醗中におけるグルコースのほとんどは麴由来のグルコアミラーゼにより生成される。三吉, 照井<sup>26)</sup>は蒸米, デキストリン, マルトースを主な反応基質としてグルコース生成速度式を設定し, 醗初期のグルコース生成速度が各基質濃度とは無関係にグルコアミラーゼ濃度に比例すること, そして醗中のオリ状物質がグルコース生成を阻害する効果を持つことなどを報告している。また, 永谷らは<sup>27)</sup>グルコアミラーゼの失活を時間に対する減少関数で表し, 濃度ではなくグルコースの生成量を基準とした速度式を提案している。しかし, プロセス制御の観点からすれば, 三吉, 照井の方法のように3種類の糖を測定して生成速度を決定するのは実用的でないし, また永谷らの方法では溶けやアルコール発酵など他の反応と関連付ける際に, 濃度への変換が必要となる。そこで, 実用的かつ濃度表現の可能な反応速度式を設定した。

蒸米-酵素仕込みの無発酵醗における, グルコース濃度  $G(g/l)$  と全糖濃度  $C_t(g/l)$  の経時変化を Fig. 9 に示す。グルコース濃度の初期における上昇は直線的であり, 時間の経過とともにグルコース濃度は全糖濃度に漸近する傾向が認められる。そこで, グルコース以外の糖をグルコアミラーゼ反応の基質と仮定して Lineweaver-Burk プロットを行った結果, Fig. 10 に示すような直線関係が得られ, さらに反応初速度とグルコアミラーゼ濃度  $E_2$  (unit/ml) には原点を通る直線関係が認められたことなどから, グルコース生成速度式として(8)式を設定した。

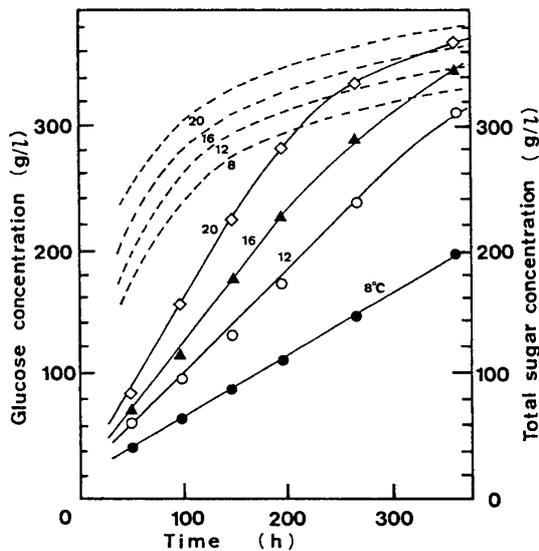


Fig. 9. Course of glucose production in a non-fermentation system.

Thirty g of steamed rice was added to 29.4 ml of 0.1 M acetate buffer (pH 5.0) containing  $\alpha$ -amylase and glucoamylase, and incubated at 8, 12, 16, and 20°C. —, glucose concentration; -----, total sugar concentration (data points are not shown). ●, 8°C; ○, 12°C; ▲, 16°C; ◇, 20°C.

$$dG/dt = K_g(C_t - G)/(K_{mg} + (C_t - G)) \quad (8)$$

$K_g$ ,  $K_{mg}$  は実験定数である。

**酵母の増殖とアルコール発酵<sup>6)</sup>** 醪中における酵母の増殖とアルコール発酵については、現在までに種々の研究<sup>28-33)</sup> がなされている。なかでも永谷<sup>28,29)</sup>

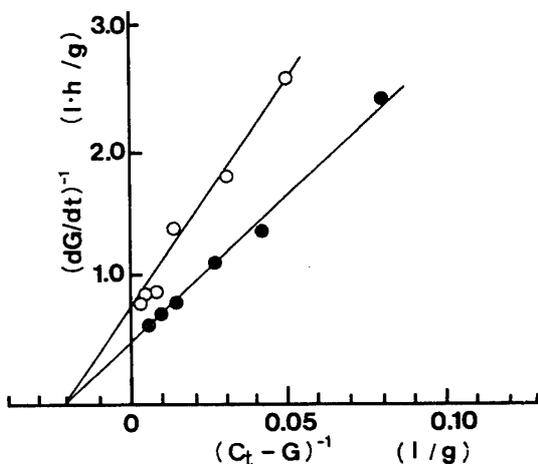


Fig. 10. Lineweaver-Burk plotting in glucose production.

○, glucoamylase 40 units/ml; ●, 50 units/ml. The temperature was 16°C.

は酵母の比増殖速度を組み込んだ発酵速度式を提案し、高松<sup>30,31)</sup> は培地中のグルコースとアルコール、そして醪中固形分などの影響を考慮した増殖、発酵の速度式を誘導している。しかし、醪中のアルコールや酵母の存在箇所、醪初期の酵母の増殖などについては検討が不足しているため、増殖、発酵の数式化に関する再検討を試みた。

酵母の増殖、発酵速度式を設定する場合、基質制限のみならず基質阻害も考慮することが望ましい。そこで Ghose と Tyagi<sup>34,35)</sup> の提案した式を基礎にし、さらにアルコールによる阻害、温度の影響などを組み込んで比増殖速度  $\mu$ 、比発酵速度  $\nu$  を (9)、(10)式でそれぞれ表現した。

$$\mu = A \cdot G / (G + K_s + G^2 / K_{s1}) \cdot \exp \{ K_1 + E_1^2 \cdot \exp(K \cdot G) + K_3 / T \} \quad (9)$$

$$\nu = A' \cdot G / (G + K_s' + G^2 / K_{s1}') \cdot \exp \{ K_1 + E_1^2 \cdot \exp(K_2' \cdot G) + K_3' / T \} \quad (10)$$

$A$ ,  $K_s$ ,  $K_1 \sim K_3$ ,  $A'$ ,  $K_s'$ ,  $K_1' \sim K_3'$  は実験定数である。

醪中におけるアルコールと酵母の存在箇所について検討した結果、アルコールは醪中で均一に存在するが、酵母は米粒内には観察されず、鼓、清水<sup>30)</sup>の報告にあるように液相に存在する、もしくは米粒表面に付着していると考えられる。

実際の醪から得た  $\mu$  の実測値と、各時点のグルコース濃度、アルコール濃度、温度の実測値を (9) 式に代入して求めた計算値を比較した結果、計算値は実測値より著しく大きな値となった。このずれが説明できると思われる実験結果として、「新鮮培地においても酵母濃度を高くすれば  $\mu$  の値が小さくなる。<sup>37)</sup>」ことが見出されたことから、醪中における酵母の比増殖速度  $\mu_s$  を、Lee らの報告<sup>30)</sup> に従い (11) 式で近似した。醪における酵母濃度  $X_m$  の実測値  $4.2 \times 10^{11}$  (cells/l) を代入して  $\mu$  を計算した結果、計算値は実測値によく一致した。

$$\mu_s = \mu \cdot (1 - X / X_m) \quad (11)$$

ただし、 $X_m$  は  $X$  の最大値。

醪中における比発酵速度  $\nu_s$  は、Luedeking, Piret<sup>39)</sup> および永谷<sup>40)</sup> が提案した数式を参考に  $\mu_s$  を含む関数として (12) 式のように表した。

$$\nu_s = \nu + \alpha \cdot \mu_s \quad (12)$$

以上述べた (9)~(12) 式を用いて、植菌量および温度を変えた醪における酵母濃度とアルコール濃度の経時

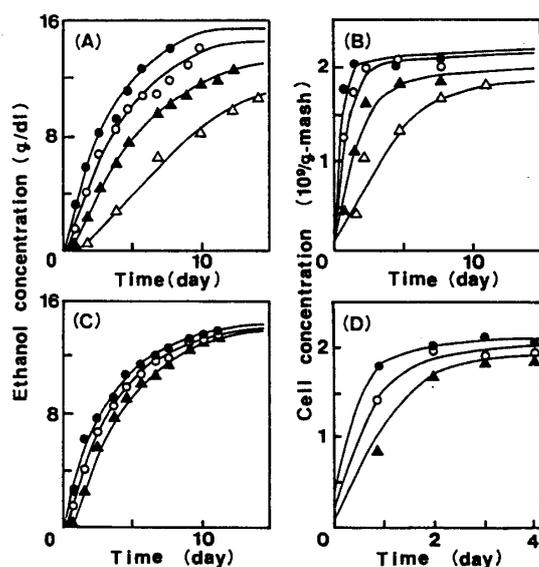


Fig. 11. Simulations of yeast growth and ethanol production in *moromi* mash.

(A) Ethanol production at different temperatures: ●, 20°C; ○, 16°C; ▲, 12°C; △, 8°C.

(B) Yeast growth at different temperatures. Symbols are the same as in (A).

(C) Ethanol production at 16°C with different inoculum sizes: ●, 5.0 ( $10^7$  cells/ml); ○, 2.5; ▲, 0.2.

(D) Yeast growth with different inoculum sizes. Symbols are the same as in (C).

変化を推定した結果, Fig. 11 に示すように良好なシミュレーションが可能であった.

## 2. 清酒醪プロセスのシミュレーションとプロセス解析<sup>40)</sup>

**清酒醪の数式モデル** 数式モデルならびにそれを用いたシミュレーションは, 永谷<sup>29)</sup>が仕込み初期における醪の温度制御を検討した報告に見出されるのみである. 醪プロセスの本質は原料米のデンプンを酵素や微生物によりアルコールに変換することにあるが, これらデンプンの液化からアルコール発酵に至る一連の反応はそれぞれ相互に関連して一つの反応系を形成することから, 反応系全体の変化を予測するには, 先に導いた数式を関連付け, 総合した数式モデルを構築する必要がある. そこで, 蒸米と麴の溶解, グルコース生成, アルコール発酵などの生化学反応と, 水, 糖, アルコールの醪中における移動に着目し, 以下に記述する項目を基礎にして Fig. 12 に示す反応の流れ図を作成した. なお, 麴中酵素の液相への溶出やプロセス

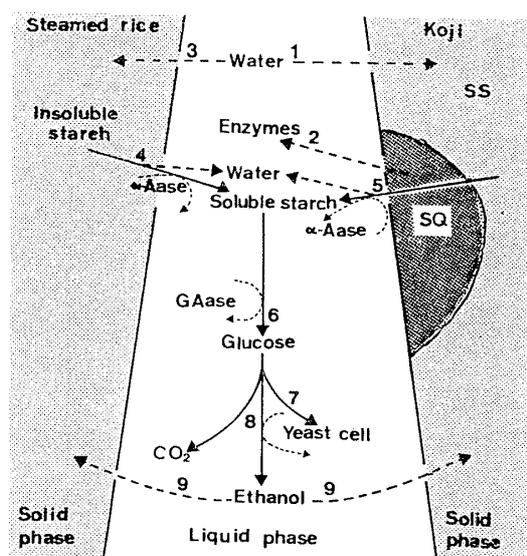


Fig. 12. Model of *sake* mashing.

→, reaction; ---→, transport; ···→, actuation  
1, water absorption of *koji*; 2, excretion of enzymes into liquid phase from *koji*; 3, water absorption of steamed rice; 4, dissolution of steamed rice; 5, dissolution of *koji*; 6, glucose production; 7, yeast cell growth; 8, ethanol production; 9, transport of ethanol into solid phase.

進行中の失活についてはいくつかの報告<sup>12,27,41)</sup>がなされているが, これらを数式化するにはさらに詳細な検討が必要であり, 本論文では, 麴から持ち込まれる各酵素量を仕込み水量で割ってそれぞれの酵素濃度とし, 発酵経過途中の酵素濃度ならびに活性の変化は無視することにした.

1. 仕込み時に麴は急速に吸水し液相量が減少する.
2. 麴に含まれる酵素が液相に溶出する.
3. 蒸米は仕込み時に吸水膨潤し, 液相量を減少させる.
4. 蒸米は  $\alpha$ -アミラーゼの加水分解作用により溶解し, 液相量が増加する.
5. 麴も蒸米と同様に溶解するが, 製麴時に酵素作用を受けた一部の基質は  $\alpha$ -アミラーゼ作用とは無関係に急速に溶出する.
6. 液相に溶解したデンプンはグルコアミラーゼにより分解されグルコースを生成する.
7. 液相中で酵母が増殖する.
8. 酵母のアルコール発酵によりグルコースからアルコールが生成される.
9. 生成されたアルコールは醪中に均一に拡散する.

最適制御など計算機を利用した高度な制御を行うには、操作変数および状態変数（プロセスの内部状態を表す変数）の設定が必要となる。<sup>42)</sup> 本研究では醪温度を操作変数とし、状態変数を以下のように決定した。

- (1) 蒸米, 麴の溶解率 (原料米溶解率)
- (2) 全糖濃度
- (3) グルコース濃度
- (4) 酵母濃度
- (5) アルコール濃度

**醪状態変化のシミュレーション** Fig. 12 の流れ図をもとに、各状態変数の関係を計算機で扱えるように、変数、速度式、パラメーターの関係に置き換えて Fig. 13 に示すフローダイアグラムを作成し、醪状態変化のシミュレーションを行った。

一段仕込み醪で温度をそれぞれ 8, 12, 16, 20°C 一定に保持した場合のシミュレーション結果を Fig. 14 に示した。また、Table 4 に示した初期条件の下、実際と同じ三段仕込み醪で、経時的に温度を変えた場合のシミュレーション結果を Fig. 15 に示した。両者とも良好なシミュレーション結果が得られ、本モデルが実際的な種々の条件下で醪状態変化の予測に有効であることが確認された。

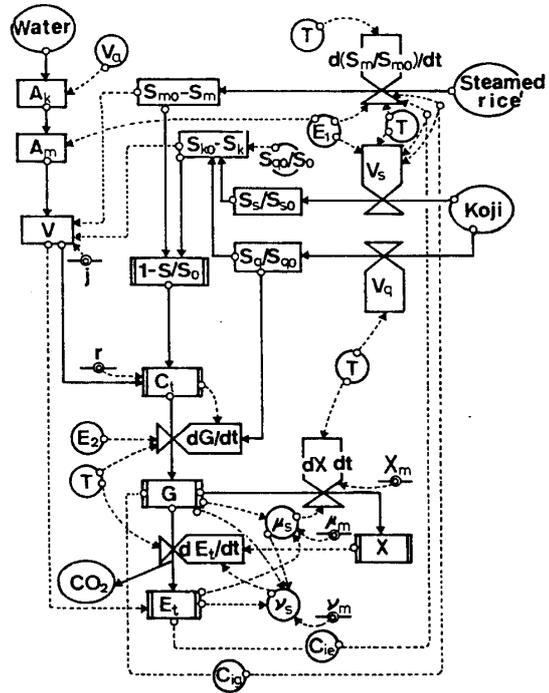


Fig. 13. Flow diagram of saké mashing model.  $\times$ , rate of state variable change;  $\square$ , main state variable;  $\square$ , sub state variable;  $\circ$ , co-variable;  $\odot$ , input or output;  $\ominus$ , parameter;  $\rightarrow$ , mass flow,  $\dashrightarrow$ , information flow. Abbreviations are described in the Nomenclature.

Table 4. Feeding procedure of three stages saké mashing.

	Feeding stage (Japanese term)			
	1st* (Mizukoji)	(soe)	2nd (naka)	3rd (tome)
Time (h)	0	12.0	60.0	84.0
Steamed rice				
amount (g)	—	33.3	60.5	123.3
water content (%)	—	36.5	36.3	36.5
Koji				
amount (g)	15.5	—	14.7	27.6
water content (%)	28.9	—	30.5	29.8
rice variety	Gohyakumangoku	—	Gohyakumangoku	Gohyakumangoku
$\alpha$ -amylase**	890	—	863	807
glucoamylase**	178	—	163	154
acid protease**	2200	—	2150	2060
$S_q/S_{q0}$ (%)	34.2	—	30.6	28.8
Water (ml)	56.0	—	66.0	148.0
Yeast	addition	—	—	—

\* First feeding stage was separated in two operations. Water and koji was mixed first, called "Mizukoji", and steamed rice was added 12 h after.

\*\* Enzyme activities are expressed by units/g koji.

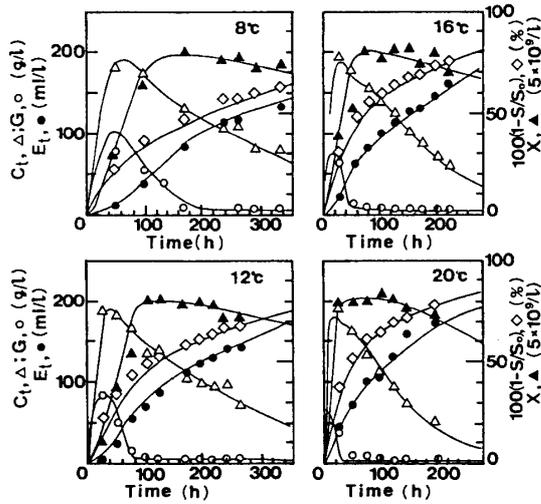


Fig. 14. Simulations of single-stage *saké* mashing at different temperatures.

A simplified *saké* mashing process (the single stage mashing) was started with 213 g of steamed rice and 62 g of *koji*, mixed in 270 ml of salt solution containing the yeast (Kyokai no. 601,  $5 \times 10^7$  cells/ml added water). Lines are simulated curves.

**シミュレーションによるプロセス解析** 醪プロセスの計算機制御を実施する場合は、システムをオンライン化するのが望ましい。発酵プロセスのオンライン制御を阻む一般的な要因としてセンサーの不備があげられる。醪プロセスにおいても、佐藤ら<sup>43)</sup>によりチュービング法<sup>44)</sup>を利用した醪中アルコール濃度の連続測定や、醪ろ液の連続サンプリングシステム<sup>45)</sup>が検討

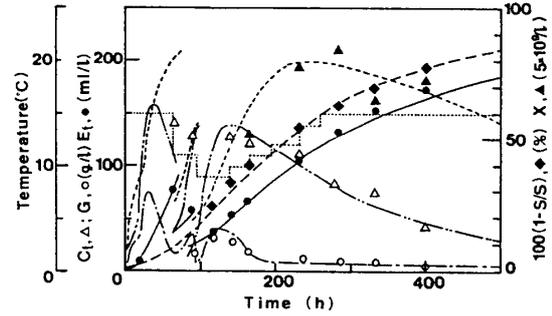


Fig. 15. Simulation of *saké* mashing in three stages process.

The procedure for mashing is summarized in Table 4. -----, temperature; other lines are simulated curves: —, ethanol concentration; ---, glucose concentration; ----, dissolution rate of rice; ----, total sugar concentration; -·-, yeast cell concentration.

されているが、他成分の影響や雑菌汚染、さらに価格などに課題が残されており、実用化には今少し時間を要するものと予想される。

センサーが不十分な現状で発酵プロセスのオンライン計算機制御が実用化されている例として、パン酵母培養の自動管理<sup>46,47)</sup>が注目される。この場合にはプロセス特性の解析結果を巧みに利用し、センサーから得られる一次情報を有効に活用してオンライン制御を達成している。そこで、醪プロセスのオンライン自動制御に応用できる知見を得るべく、シミュレーション上で各反応の動特性を解析した。

まず、感度解析的な手法を用いて、操作変数である

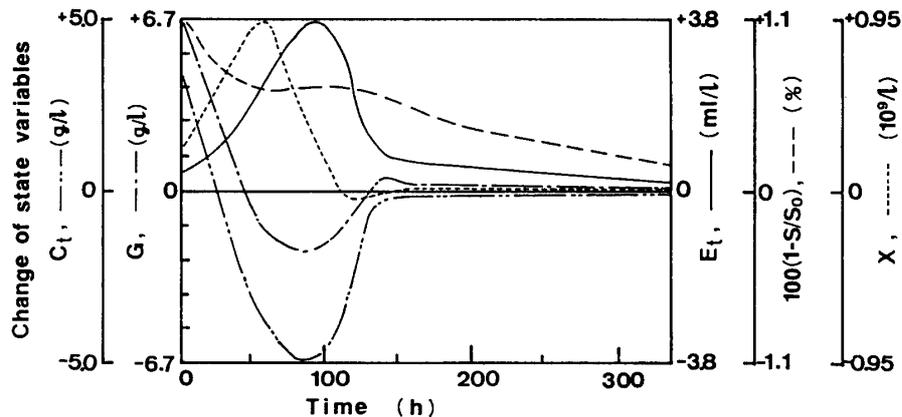


Fig. 16. Responses of state variables to changes of temperature.

The conditions for calculation: ratio of added water, 135%;  $\alpha$ -amylase activity of *koji*, 850 units/g *koji*; glucoamylase, 160 units/g *koji*; variety of rice, "Yamadanishiki" for *koji*; inoculum size of yeast,  $5 \times 10^7$  cells/ml added water; standard course of temperature, started at 8°C, raised linearly for 72 h to 16°C, then kept at 16°C.

温度に対する各状態変数の変動特性を解析した。解析結果を Fig. 16 に示す。一段仕込みで、汲み水歩合135%、麴歩合23%とし、「山田錦」「日本晴」からそれぞれ常法どおり調製した麴、蒸米を用いて、醸温度を初発 8°C、72時間目に 16°C になるように直線的に上昇せしめ、以後 16°C 一定に保つような温度経過（基準温度）でシミュレートして得られる各状態変数の値を基準値とした。そして、任意の時点で基準温度から 1 日間で 1°C、温度を上昇させてシミュレートし、各状態変数の基準値からの変動量を縦軸にとった。まず、酵母濃度が仕込み後約70時間目に最大の変動を示し、続いて80~90時間目に全糖濃度、グルコース濃度、アルコール濃度に最大変動が認められた。しかし、これらの状態変数は150時間目以降、アルコール濃度のわずかな変動をのぞき、温度を変化させてもほとんど変動しない。これに対し原料米溶解率は時間経過とともに変動量が小さくなるが醸後期でも変動し易く、プロセス全期間を通して温度により操作し易いと考えられる。

次に醸中の主な反応である原料米の溶解、グルコース生成、アルコール発酵の反応速度を比較することにより、醸中各反応の動特性を解析した。総米 1000 kg の仕込みを想定して、前述の変動特性解析時と同じ条件でシミュレーションを行った。反応速度は 1 時間当たりの反応グルコース量に換算した。各反応速度の経時変化を Fig. 17-(A) に示したが、反応速度から判断される各反応間の関係からプロセスは大きく二つの時期（フェイズ）に分割される。すなわち、原料米の溶解、グルコース生成、アルコール発酵が互いに他の反応に制限されずに変化する第 1 フェイズ（First phase）、そして三者が密接に関連しほぼ等しい反応速度を示す第 2 フェイズ（Second phase）である。このようにプロセス途中でフェイズに切り変わりが生じたり、第 2 フェイズにおいて三者がほぼ等しい速度をとる原因は、グルコースの生成速度、またグルコース生成反応の基質である可溶性デンプンの液相への供給速度（原料米の溶解速度）が酵母の増殖に伴って急速に増大する発酵速度と比較して相対的に小さくなり、グルコース生成が溶解によって、アルコール発酵がグルコース生成によって、それぞれ律速されるためと考えられ、第 2 フェイズにおいては原料米の溶けに他の 2 反応が制限されて反応が進むと推察される。

Fig. 17-(B) のように温度経過を低くすると、溶解グルコース生成、アルコール発酵すべての反応速度が低下して、第 1 フェイズの期間が長くなり、逆に

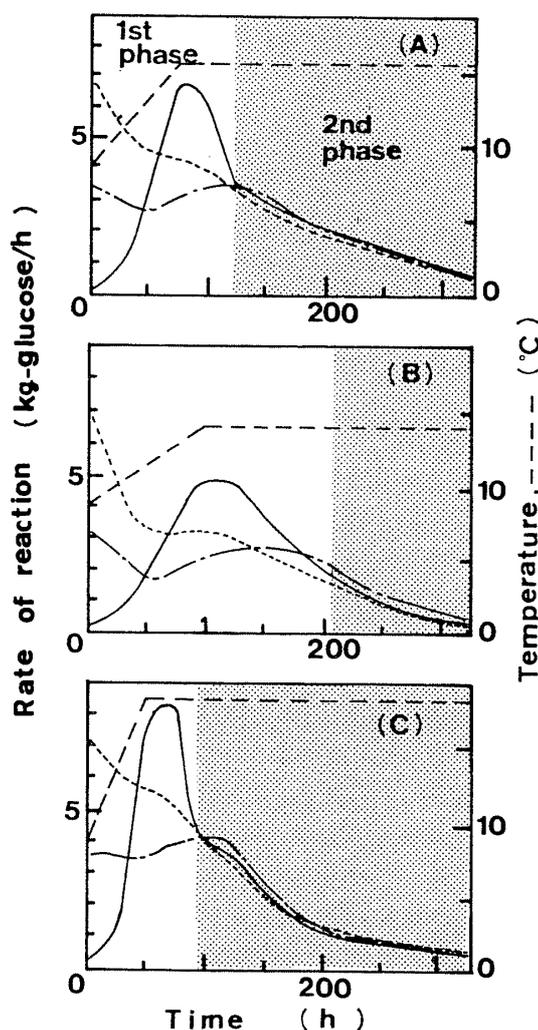


Fig. 17. Reaction rates in *saké* mashing at different temperatures. Conditions for calculation are the same as Fig. 16.

Lines: —, glucose consumption rate by fermentation; ---, rice dissolution; - · - ·, glucose production.

Fig. 17-(C) のように温度経過を高くするとすべての反応速度が増大して第 1 フェイズの期間は短縮される。

布川、角谷<sup>13)</sup>は原料米溶解による液相への糖の供給が十分であれば、95 units/g-白米の高いグルコアミラーゼ濃度下でも、アルコール発酵がグルコース生成に追従することを報告し、布川<sup>14)</sup>は、醸中における酸性プロテアーゼの働きを検討するなかで、一般的な醸では原料米の溶解が糖化を、糖化がアルコール発酵を律速するであろうことを考察している。本解析においても布川の考察を裏付ける結果が得られた。

さて、センサーの未整備な現状で醸プロセスのオンライン計算機制御を試みる際、これらの知見は意味深

い示唆を与える。すなわちプロセス前半では発酵を、後半では原料米の溶けを重点的に管理する必要があるが、プロセス後半では原料米の溶けが発酵の律速段階となることから、オンライン測定が難しい原料米溶解の管理はオンライン測定の比較的容易なアルコール発酵の管理に置き換えることが可能と考えられ、したがって、プロセス全期間でアルコール発酵のみをオンライン計測することにより実用的な自動制御の行える可能性が示唆される。

### 3. 計算機を援用する醸造プロセスの自動制御<sup>40,48)</sup>

清酒醸造では製品の味や香りなどが重視される。したがって、工程管理においても収率や生産性以上に、品質の管理が重要となる。そこで、計算機制御に従来行われてきた杜氏の管理技術を応用するため、従来の管理作業について再考した。その結果、Fig. 18 に示すようなフィードバックループが得られたが、ここには2種類の高度な制御が内包されている。すなわち「目的の状態に近付けるにはどのような操作をするか。」という最適制御、さらに「外乱などによる不測の状態変化に対してできるだけ系を最適状態に保持するにはどうするか。」という適応制御である。したがって計算機制御により、従来通り、あるいは従来以上に厳密な管理を行うには、これらの制御をソフトウェアに組み込む必要がある。

**制御方法** 最適制御を行うには、いかなる目的で制御するかを数学的に記述した目的関数<sup>2)</sup>が必要となる。通常、生産性の向上やコストの低減が目的関数に組み入れられるが、醸造プロセスでは生成物である清酒の味や香りなど品質が重視されることから、品質も評

価の対象となり得る。しかし、品質の評価は人間の官能に依存する面が強く、佐藤ら<sup>49)</sup>の優れた研究があるにもかかわらず、再現性良く、かつ簡便に品質を数値化するのには容易でない。そこで、本研究では、「仕込み配合、原料白米の精米率など基本的な条件が同じ場合に、二つのプロセスで状態変数が同じ経過をとれば、同じ品質の清酒が得られる。」と仮定し、あらかじめ選定した目標プロセスと制御プロセスの状態変数の差の総和をもって目的関数とした。

目的関数  $J$  を(13)式に示す。

$$J = \int_t^{t_f} \sum_{i=1}^5 a_i \cdot (Y_i - Z_i)^2 dt \quad (13)$$

すなわち、 $J$  は各状態変数の予測値  $Y_i$  と、目標プロセスの状態変数値  $Z_i$  の差の二乗和を現時点  $t$  からプロセス終了時点  $t_f$  まで積分した値であり、 $J$  の値を最小とする温度経過が最適政策となる。 $a_i$  は重み係数である。

Fig. 19 に最適制御の概略を示した。仕込み配合など基本的な条件が同じプロセスから、生成酒の品質および収率において最良と判断されるプロセスを目標プロセスとして選出し、制御対象プロセスの状態変数の値が目標プロセスの状態変数の値に可能な限り一致するように管理して行く。状態変数の実測値（実プロセスの情報）を一定時間毎に計算機に入力しつつ、計算機により種々の温度経過で現時点以降の醸造状態変化を予測する。そして、状態変数の予測値と目標プロセスの状態変数値の差の二乗和が最小となるような最適温度経過を決定し、決定された温度経過に一致するように醸造温度を制御して行く。このループをプロセス終了まで繰り返す。

**制御システム** まず、製造目的に従って目標プロ

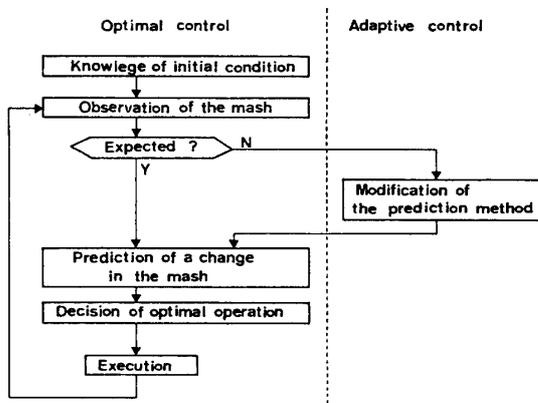


Fig. 18. Control of *saké* mashing process by a brew-master (*touji*).

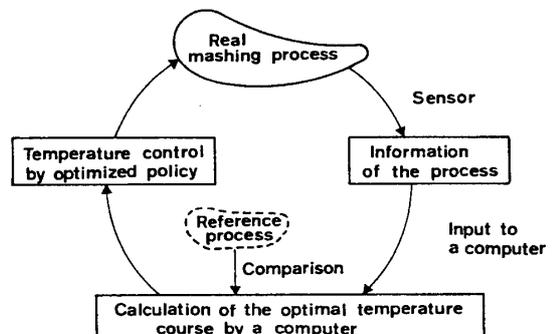


Fig. 19. Strategy for optimal control of *saké* mashing.

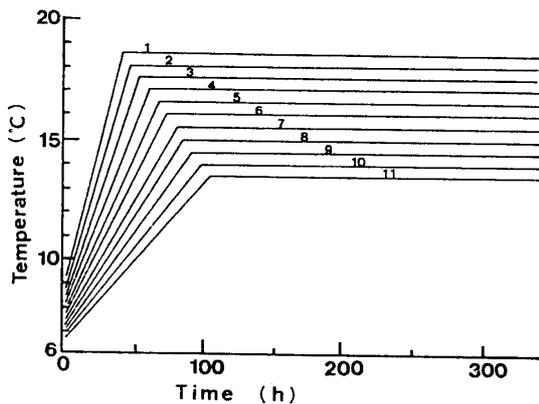


Fig. 20. Temperature profiles used for the optimal control of *saké* mashing.

セスを選択し、各状態変数の0.1日毎の値を計算機に入力する。次に初期条件を入力した後、最適化計算を行う。最適化計算は、提案したモデルが非線形であり、かつ次数が高く離散化して計算すれば計算量が膨大となることから、最大原理<sup>50)</sup>やダイナミックプログラミング<sup>51)</sup>は使いにくい。そこで Fig. 20 に示すような実用範囲内にある11種類の温度経過で状態変化を予測し、目的関数を最小にする温度経過を直接探索法により決定することにした。また、極端な温度操作の変動を避けるため1回の最適化において変更される温度経過は上下3段階以内に留める。

誘導したシミュレーションモデルにより醪状態変化の精度良い予測が可能であることは既に述べたが、醪プロセスは微生物反応であることからプロセス進行中にプロセス特性が変化するなど、予測誤差の生じる可能性は否定できない。予測誤差が生じれば、最適化に

おいて誤った決定がなされ、事実上最適制御は意味を失う。そこで予測誤差が生じても自動的に誤差を解消する機能として、モデル修正をシミュレーション過程に組み込んだ。まず、 $f_1=0.95$ ,  $f_2=1.00$ ,  $f_3=1.05$ , 3種類のファクターを設ける。そして、原料米溶解、グルコース生成、アルコール発酵の速度式にこれらのファクターを掛け合わせて現時点までのシミュレーションを行い、状態変数の実測値に最もよく一致するシミュレーション結果を与えるファクターを決定して、以後の制御には決定したファクターを掛け合わせたモデルを用いる。計算、ならびにファクターの決定は1日毎に行う。

**実験室規模の計算機制御** 総米 200 g, 汲み水歩合 135%, 麴歩合23%の一段仕込みを行い、酵母は協会6号泡無し株を用いた。麴、蒸米は常法通りに調製し、酵母は用いず酵母仕込みとした。1日毎の実測データをオフラインでコンピューターに入力して計算機による最適制御を行った。

初期条件が同じA, B 2本の醪を調製して48時間同じ温度経過をとらせた後、Aは所定の温度経過をとらせ、Bは最適制御を行った。Fig. 21 に各状態変数の経時変化を示した。Aでは、48時間目における目標プロセスからの状態変数のずれが150時間以降も改善されないが、最適制御を行ったBでは時間の経過とともにずれが解消され、プロセス終了時には各状態変数が目標プロセスの状態変数値によく一致した。

Aの生成酒はアルコール濃度 146 g/l, 日本酒度 +1.5, Bの生成酒はそれぞれ 141 g/l, -2.0であった。Aの酒は目的の日本酒度 (-2.0) より+側にあり、酒

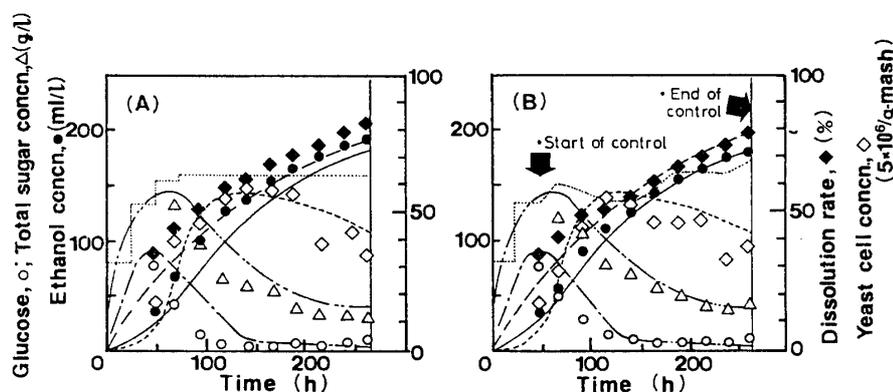


Fig. 21. Process control of single-stage *saké* mashing.

(A): not controlled. (B): controlled by the system of this study. The procedure for mashing is described as the same in Fig. 14: Enzyme activities,  $\alpha$ -amylase, 882 units/g *koji*; glucoamylase, 224 units/g *koji*. Lines: ..... , temperature; other lines are the template data of target processes for control.

Table 5. Feeding procedure of the process controlled.

	Feeding stage (Japanese term)			
	( <i>moto</i> )	1st*	2nd ( <i>naka</i> )	3rd ( <i>toke</i> )
Steamed rice				
amount (kg)	54	167	294	570
water content (%)	—	35.8	36.0	35.6
<i>Koji</i>				
amount (kg)	26	58	69	136
water content (%)	—	29.7	29.6	30.0
Enzyme activity				
$\alpha$ -amylase**	—	665	664	651
glucoamylase**	—	120	118	111
acid protease**	—	2246	2250	2374
$S_0/S_{00}$ (%)	—	24.4	24.5	27.0
Water (l)	59	160	308	823

\* the whole of first feeding stage (*mizukoji* and *soe*). \*\* see Table 4.

造用語で言う「切れ過ぎ」の傾向にある。また官能検査の結果、Bの酒に味、香りの問題点は見出されなかった。以上、実験室規模ではあるが、良好な制御結果が得られたことから、計算機制御によっても従来同様、厳密なプロセス管理が可能と考えられる。

パイロットスケールのオンライン自動制御 ジャケット冷却式の 3kl 密閉型発酵タンク (内径 1510 mm, 深さ 2170 mm) を用いて総米 1000 kg の 3 段仕込みを行い、留仕込み以後計算機を用いたオンライン自動制御を行った。仕込み配合、麹の酵素活性等を Table 5 に示した。酵母は当社保存のアルコール耐性

泡無し株を用いた。

制御装置の概略を Fig. 22 に示した。アルコール濃度は、柴田<sup>52)</sup>の方法に従い発酵ガスの発生速度を測定してコンピューターにオンライン入力し計算により求めた。醪の温度制御方法としてカスケード制御を採用した。すなわち、デジタル式プログラム調節計 (DPC) で壁側に近い A 点の温度を制御し、検出の時間遅れを短縮する効率良い制御を行うとともに、A, B 両点の温度から醪の平均温度を検出しつつ、設定値に近づくようコンピューターにより DPC の設定値を変更する方式である。

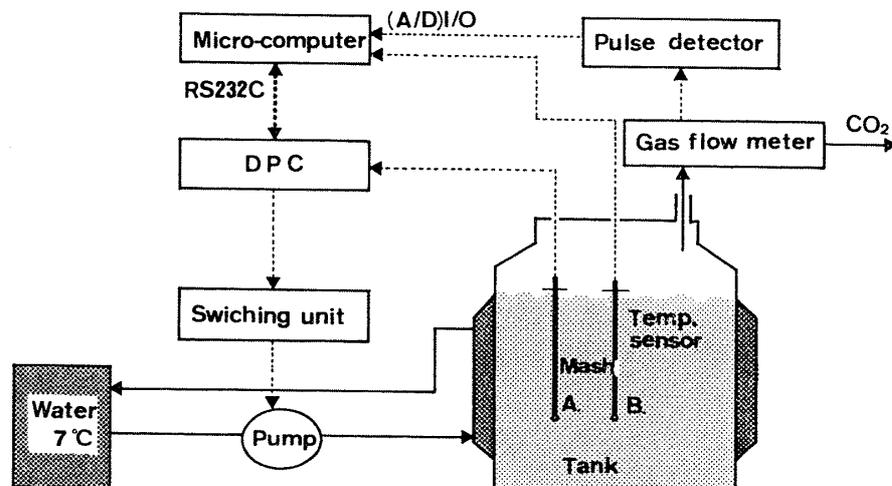


Fig. 22. Control system of the mashing in a pilot scale. DPC: digital programmable controller.

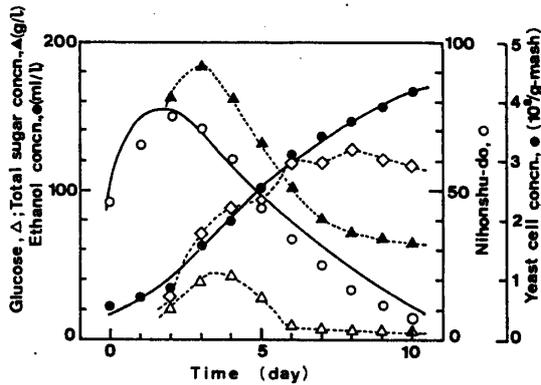


Fig. 23. Process control of *saké* mashing in a pilot scale.

—, the template data of the target process for control. - - - -, trace of observed values.

目的関数の独立変数は、オンライン推定するアルコール濃度、および実際面を考慮して日本酒度を採用した。最適化において選択される温度経過は実際的な9本の温度経過 (Fig. 24 参照) を新たに設定し、1日毎に最適化計算を行った。

制御実験における各状態変数の経時的変化を Fig. 23 に示す。図より明らかなように、留後3日目まで、および6日目以降で日本酒度の値が目標プロセスの日本酒度から、やや外れる傾向が認められたが、最も重要な状態変数であるアルコール濃度はプロセス全期間を通してよく一致しており、全体として良好な制御が可能であった。

Fig. 24 には醪平均温度の経時変化を示した。破線はプロセス進行とともに決定された最適温度設定値、実線は平均温度である。最適温度設定値と平均温度の

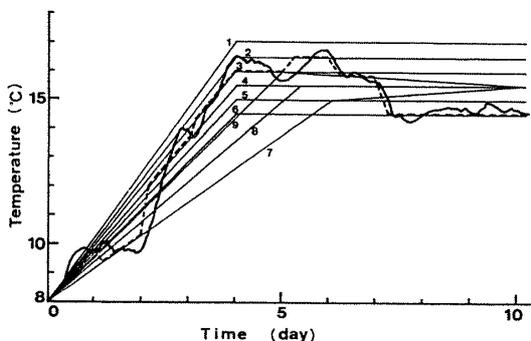


Fig. 24. Changes temperature in the mashing process controlled by the presented system.

—, mash temperature; - - - -, temperature optimized; lines with number, the temperature profiles used for the optimal control.

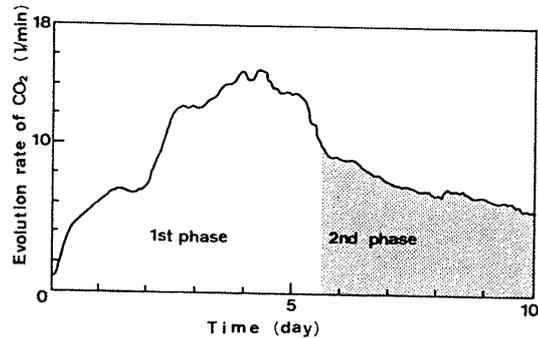


Fig. 25. Course of fermentation rate in the controlled process.

—, evolution rate of CO<sub>2</sub> gas.

経時変化パターンは全般的に一致しており、制御が確実に行われたことを示している。しかし、設定値と実測値の間には、最大で  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  の温度差が認められた。

Fig. 25 には炭酸ガス発生速度の経時変化を示した。ガス発生速度はグルコース濃度が低下し、最低値と考えられる  $5\text{ g/l}$  に近づく5日目から6日目にかけて急激に減少し、この時期に前述のフェイズの切り変わりがあったと推定される。

留仕込み時を0日として、予定通り11日目に制御を終了し、アルコール添加して1日後に上槽した。上槽酒の成分は日本酒度が  $+4.5$  (目標値,  $+2.0$ )、酸度  $1.9$ 、アミノ酸度  $1.2$ 、アルコール濃度  $153\text{ g/l}$  (目標値,  $155\text{ g/l}$ )、グルコース濃度  $4.0\text{ g/l}$ 、全糖濃度  $5.9\text{ g/l}$  であり、粕歩合は  $28.8\%$  と目標値 ( $28.0\%$ ) に近い値が得られた。また、熟練したパネラー8名による官能検査を行った結果、味、香りともに良好との検査結果が得られた。

以上、最終のアルコール濃度、粕歩合ともに目的に近い値が得られたことから、開発した計算機制御システムにより醪プロセスの自動管理が可能と考えられる。

### おわりに

コンピューター精米,<sup>53)</sup> 圧搾機からの酒粕分離作業のロボット化など、清酒醸造のFAは現実のものとなりつつある。しかし、初めに述べたように清酒醸造におけるFA達成の鍵は、発酵プロセスの自動管理にあると考えられる。本論文では、清酒醸造プロセスの中でも中心的なプロセスである醪プロセスにおいて、その自動管理システムの一案を提起し、提案したシステムによっても目標とする品質の清酒が、適正な収率で醸造できることを明らかにした。

本システムをさらに発展させるには、味や香りなど品質の数値化や、酒質と深く関連する成分の生成機構や酵母の代謝機構を解明し各成分の消長を数式化する、あるいはそれらをオンライン計測するなど、品質面の管理を強化するための努力が必要である。さらに、温度以外の操作変数を併用する多変数制御も制御性の改善を計る上で大切な課題となる。また実際の醸造に計算制御を応用する際には、既存の設備との対応、システムの安定性の確保など、さまざまな問題が発生するであろう。これらの課題や問題の解決は計算機制御システムの導入を進めつつ解決するのが望ましいと考え

## 記 号

- $A_k$  : 麴による吸水量,  $l$   
 $A_m$  : 蒸米による吸水量,  $l$   
 $C_{ie}, C_{ig}$  : エタノールおよびグルコースによる蒸米溶解反応の阻害係数,  $l/g$   
 $C_t$  : 全糖濃度,  $g/l$   
 $E_1$  : 醪中の  $\alpha$ -アミラーゼ濃度,  $units/l$   
 $E_2$  : 醪中のグルコアミラーゼ濃度,  $units/l$   
 $E_t$  : アルコール濃度,  $g/l$   
 $G$  : グルコース濃度,  $g/l$   
 $j$  : グルコースの溶解に伴う液量増加率 (0.612),  $ml/g$   
 $r$  : デンプンからグルコースへの変換率 (1.11),  $g\ glucose/g\ starch$   
 $R$  : 麴重量,  $g$   
 $S$  : 原料米溶解における未溶解基質の重量,  $g$   
 $S_q$  : 麴の溶解における SQ (易溶解性基質) の未溶解基質重量,  $g$   
 $S_s$  : 麴の溶解における SS (難溶解性基質) の未溶解基質重量,  $g$   
 $T$  : 反応温度,  $^{\circ}K$   
 $t$  : 反応時間,  $h$   
 $V$  : 醪の液相量,  $l$   
 $V_a$  : 汲み水量,  $l$   
 $V_q$  : SQ の溶解速度,  $l/h$   
 $V_s$  : SS の溶解速度,  $l/h$   
 $V_t$  : 醪に含まれる全水分量,  $l$   
 $X$  : 酵母濃度,  $cells/l$   
 $X_m$  : 最大酵母濃度,  $cells/l$   
 $\mu$  : 液体培地における酵母の比増殖速度,  $1/h$   
 $\mu_s$  : 醪における酵母の比増殖速度,  $1/h$

- $\nu$  : 液体培地におけるアルコールの比生成速度,  $g\ ethanol/g\ cell \cdot h$   
 $\nu_s$  : 醪におけるアルコールの比生成速度,  $g\ ethanol / g\ cell \cdot h$

本研究の遂行に際し、終始ご懇篤なるご指導を賜った大阪大学工学部田口久治教授ならびに同学部吉田敏臣助教に謹んで感謝いたします。

また、本論文の発表をお許しいただいた菊正宗酒造株式会社取締役社長嘉納毅人氏、ならびに同社取締役常務渡辺和夫氏に深謝いたしますとともに、本研究の遂行にあたり、共に実験していただいた田中伸哉氏、河野吉男氏に深く感謝いたします。

## 文 献

- 1) 鈴木明治：醸協, 56, 936 (1961).
- 2) 長田 正：フィードバック制御, p. 180, オーム社, 東京 (1971).
- 3) 藤田栄信, 杉本芳範, 田中伸哉, 吉田敏臣, 田口久治：醸酵工学, 61, 331 (1983).
- 4) 藤田栄信, 杉本芳範, 田中伸哉, 吉田敏臣, 田口久治：醸酵工学, 62, 63 (1984).
- 5) 杉本芳範, 田中伸哉, 古川彰久, 渡辺和夫, 吉田敏臣, 田口久治：日本醸酵学会大会要旨集, p. 46 (1984).
- 6) 田中伸哉, 杉本芳範, 鈴木良子, 古川彰久, 渡辺和夫, 吉田敏臣, 田口久治：醸酵工学, 62, 391 (1984).
- 7) 三吉和重, 照井堯造：醸工, 45, 973 (1967).
- 8) 永谷正治, 水谷行夫, 難波康之祐：醸工, 51, 35 (1973).
- 9) 蔭山君雄(編)：灘の酒用語集, 灘酒研究会発行, 神戸 (1979).
- 10) 布川弥太郎, 合瀬健一：醸協, 71, 863 (1976).
- 11) 鼓 尚夫：醸協, 62, 589 (1967).
- 12) 三吉和重, 佐藤幸富, 照井堯造：醸工, 51, 315 (1973).
- 13) 布川弥太郎, 角谷貞夫：醸協, 73, 785 (1978).
- 14) 布川弥太郎：醸酵工学, 58, 391 (1980).
- 15) Nitta, Y., Hiromi, K., Ono, S.: *J. Biochem.*, 69, 577 (1971).
- 16) 日本醸造協会発行：清酒製造技術, 東京 (1979).
- 17) 永谷正治, 水谷行夫, 難波康之祐：醸工, 51, 178 (1973).
- 18) Nunokawa, Y., Sumiya, S., Iwano, K.: *J. Ferment. Technol.*, 56, 380 (1978).
- 19) 鼓 尚夫：醸協, 62, 1263 (1967).
- 20) 古川恵司, 渡辺和夫：醸協, 80, 67 (1985).
- 21) 岡崎 浩：農化, 24, 88 (1950).
- 22) 三吉和重, 小山和男：醸協, 70, 277 (1975).
- 23) 永田興四郎, 中沢英五郎：醸協, 71, 121 (1976).
- 24) 家村芳次, 藤田栄信：醸協, 77, 260 (1982).
- 25) 曾我英介, 米崎治男：醸協, 69, 855 (1974).
- 26) 三吉和重, 照井堯造：醸工, 49, 935 (1971).
- 27) 永谷正治, 木曾邦明, 布川弥太郎：醸工, 53,

- 471 (1975).
- 28) 永谷正治：醸工，51，205 (1973).
- 29) 永谷正治：醸工，51，473 (1973).
- 30) 高松 智，吉田敏臣，上田隆造，田口久治：醸工，52，190 (1974).
- 31) 高松 智：大阪大学博士論文 (1974).
- 32) 鈴木昭紀，永谷正治，薄井敏明，菅間誠之助：醸協，67，362 (1972).
- 33) 鈴木昭紀，西谷尚道，志垣邦雄：醸協，67，449 (1972).
- 34) Ghose, K., Tyagi, D.: *Biotechnol. Bioeng.*, 21, 1402 (1979).
- 35) Webb, J.: *Enzyme and Metabolic Inhibitors*, Academic Press, New York (1963).
- 36) 鼓 尚夫，清水 剛：醸協，58，1181 (1963).
- 37) Strehaiano, P., Mota, M., Choma, G.: *Biotechnol. Lett.*, 5, 135 (1983).
- 38) Lee, M., Pollard, F., Coulman, A.: *Biotechnol. Bioeng.*, 25, 497 (1983).
- 39) Luedeking, R., Piret, L.: *J. Biochem. Microbial. Technol. Eng.*, 1, 393 (1959).
- 40) Sugimoto, Y., Tanaka, N., Furukawa, A., Watanabe, K., Yoshida, T., Taguchi, H.: *J. Ferment. Technol.*, 64, 187 (1986).
- 41) 椎木 敏，布川弥太郎：醸酵工学，58，355 (1980).
- 42) 長谷川健介：制御理論入門，p. 267，昭光堂，東京 (1973).
- 43) 佐藤和夫，近藤恭一，太田剛雄，吉沢 淑，中村 欽一：醸協，80，553 (1985).
- 44) Dairaku, K., Yamane, T.: *Biotechnol. Bioeng.*, 21, 1971 (1979).
- 45) 佐藤和夫，吉沢 淑，近藤恭一，本吉 徹，三島 秀夫，竹村成三：日本農芸化学会大会要旨集，p. 482 (1986).
- 46) Nanba, A., Hirota, F., Nagai, S.: *J. Ferment. Technol.*, 59, 383 (1981).
- 47) 渡辺泰生，高橋道雄，石川 尊，柄沢次男，市川 真琴，道木泰徳：日本醸酵工学会大会要旨集，p. 131 (1983).
- 48) 杉本芳範，田中伸哉，古川彰久，渡辺和夫，吉田敏臣，田口久治：醸協，82，205 (1987).
- 49) 佐藤 信，川島 宏，丸山良光：醸協，69，774 (1974).
- 50) 高橋安人：システムと制御，下巻，p. 460，岩波書店，東京 (1981).
- 51) 尾形克彦著：ダイナミックプログラミング，培風館，東京 (1980).
- 52) 柴田正人：醸酵工学，57，445 (1973).
- 53) 小西康夫：第9回酒米懇談会講演要旨集，酒米研究会編 (1985).

(昭62. 3. 9受付)