

〔醸酵工学 第66巻 第6号 461-467. 1988〕

深槽発酵槽における清酒醪の浮上現象

柴田 正人^{1*}・菅 健一²愛知県食品工業試験所¹, 大阪大学工学部発酵工学科²

Floating phenomena of Sake-mash in large-scale deep fermentors. MASAHITO SHIBATA,^{1*} KENICHI SUGA² (*Food Research Institute, Aichi Prefectural Government, 2-1 Shinfukujicho, Nishi-ku Nagoya 451,*¹ *Department of Fermentation Technology, Faculty of Engineering, Osaka University, Yamada-oka, Suita-shi, Osaka 565, Japan*²) *Hakkokogaku* 66: 461-467. 1988.

The circulating flow of mash in a deep fermentor for *saké* brewing was investigated by measuring the floating rate of clustered rice in the fermentor (8.0 m × 3.3 m Φ).

1) The circulating flow of mash was caused by the flotation of clustered rice due to the buoyancy of CO₂ gas produced in the sedimented zone of rice particles.

2) The flotation occurred intermittently and continuously playing an important role in mixing the mash in the industrial large-scale fermentor.

3) The floating mash which rose along the inside wall of the fermentor was rectangular in shape, and mostly about 30 cm in length and 20 to 30 cm in width. The minimum and maximum fluxes were 8.3 and 11.8 g/cm²·min (av. 10.1).

The floating mash near the center of fermentor was most frequently circulating, about 30 cm in diameter, and its minimum and maximum fluxes were 26.3 and 118.7 g/m²·min (av. 56.2).

深槽発酵槽での清酒醪の発酵力による自己流動現象を明らかにすることは、醪の温度分布、発酵槽壁面での伝熱速度、醪の成分分布、発酵速度など多くの発酵現象の解析に重要である。しかし、通常使用されている 10 kl 程度の比較的小型の発酵槽では清酒醪の流動現象が認めにくく、また、清酒醪が高濃度の米粒子を含有するスラリーであるため目視的観測やトレーサーによる観測が困難であるために、これまで定量的に流動現象を研究した報告は見あたらない。従来、醪の発酵状態は醪液面の泡の状態や発酵ガス速度あるいはその成分分析から推定されることが多い。しかし、これらの情報は、深槽発酵槽における清酒醪の自己流動現象を知る目的には必ずしも十分ではない。高松ら¹⁾は発酵槽内の清酒醪の混合特性を検討するため、直径 15 cm の小径円筒形発酵槽において、液深 150 cm の蒸米懸濁液およびグリセリン溶液に槽底よりガスを注入したときの混合特性を、逆流を伴う槽列モデルで解析

している。また、永谷^{2,3)}は清酒醪のかく拌トルクの測定より、仕込後 50 時間までを非流動状態の醪、100 時間以後を流動性のある醪と定め、かく拌トルクと伝熱係数との関係を求めている。また、ビール醪の流動状態についても発酵槽の形状や発酵ガスの浮上に関して動力的な観点から検討が行われている。⁴⁻⁸⁾しかし、これらの知見は、上記の目的に対してある程度の予測を与えるが、高濃度スラリーの清酒醪にそのまま適用することは困難と考えられる。

著者ら⁹⁾は、これまでに直径、高さ、容積がそれぞれ 2.9 m, 7.5 m, 45 kl および 3.3 m, 10.9 m, 90 kl の深槽発酵槽について落泡後の醪液面の観察および温度分布の経時変化から、醪の流動を醪の浮上現象から推察できることを示唆した。これら実用規模の大型発酵槽の理論的設計法を導出するために、本報では、発酵によって浮上する浮上醪の形状、位置、浮上持続時間、浮上速度、浮上醪の発生位置等を測定し、醪の自己流動状態を定量的に算出し、浮上醪の流動モデルを検討した。

* 連絡先, Corresponding author

実験装置および実験方法

深槽発酵槽 発酵槽の形状は、前報⁹⁾と同様、槽底は中央部が上に凸の円錐形であり、直径 3.3 m、高さ 10.9 m、容積 90 kl の直立円筒型である。

仕込み 白米 30.7 t、全醪容積 68.4 kl (酒母を含む) を仕込み回数 5 回で行った。ここで平均醪深さは 8.0 m であり、酵母には協会 7 号を用いた。発酵初期において泡が発生するため、醪液面の観察や浮上醪の浮上速度の測定は泡がなくなった最終仕込み後の発酵 9 日目から行い、外力による醪かく拌は全く行わなかった。

醪の浮上速度の測定 Fig. 1 に示すように、パイプ (内径 12.4 cm、板厚 1 mm、長さ 30 cm) の一端に収容容積 20 l の軟質フィルムの袋を取付けた浮上醪採取器を使用し、開口部側を下向きにして上端が醪液面より 1~2 cm 下方に位置するように浮上醪の中心部に挿入し、浮上醪を採取することにより浮上速度を測定した。一方、Fig. 2 に示すように槽底より 2.0 および 2.2 m の位置に熱電対温度計を挿入し、各位置で浮上醪が通過する際に生ずる温度変化を記録して浮上醪の流動現象の確認とその位置での浮上速度を測定した。ここで、温度計は、それぞれ壁面からの距離が 5, 10, 20, 30 cm の 4 箇所に設定した。

浮上醪の外観的観察 発酵槽の内径と同じ長さの物差しを液面に水平に固定し、浮上醪の浮上位置、浮上醪の形状および大きさをビデオレコーダーあるいは写真撮影により測定した。これらの外観的観察は、浮上速度の測定と同様に、90~255 分間連続して行った。

米粒子濃度の測定 採水器 (500 ml 広口試薬ビン使用)¹⁰⁾を用いて、各深さ位置の醪を採取し、米粒子のみが分離できる 20 mesh ふるいでふるい別けし、得られた残醪の試料醪に対する重量%を米粒子濃度とした。

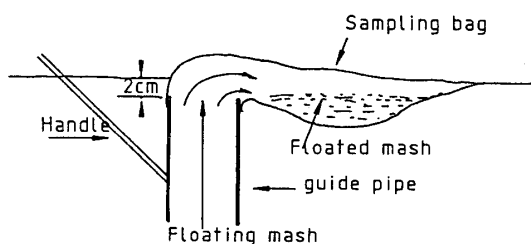


Fig. 1. Sampler for floating saké mash.

Floated mash flows into the sampling bag through guide pipe.

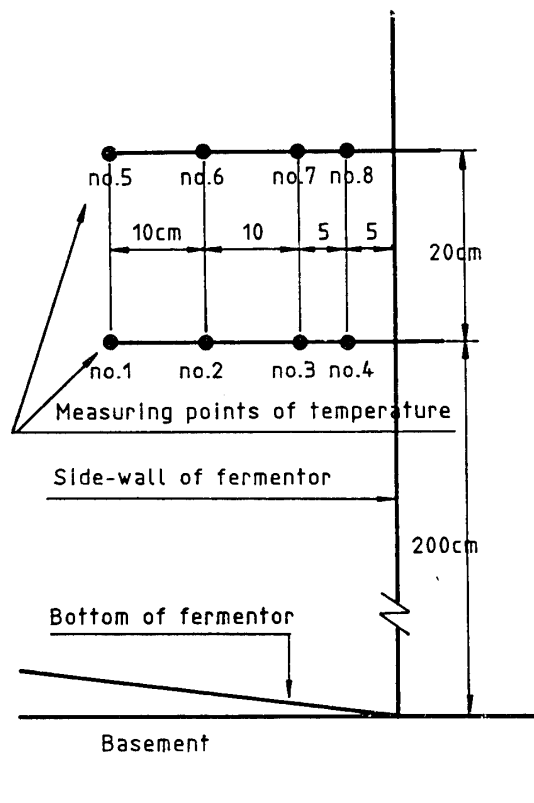


Fig. 2. Measuring position of mash-temperature. Thermocouples were provided at 8 points, no. 1 to 8.

発酵ガス速度の測定 発酵槽を密閉し、発酵槽上部の排気管に乾式ガスメータを持続することにより、発酵で生成する発酵ガス速度を測定した。¹¹⁾

実験結果および考察

液面の外観的観察 落泡後の液面の観察結果から醪の動きを大別すると、醪の固まりが数分から 1 時間以上にわたって連続的に浮上する場合と、数秒で分散し消滅する場合とがあり、前者を連続米粒子群、後者を単独米粒子群、これらを総称して浮上醪と呼ぶこととした。また、前報⁹⁾で報告した清酒醪の温度分布のある領域が壁面から 20 cm の範囲にのみ存在することを考慮し、Fig. 3 に示すようにここでは醪の伝熱に関係する領域として壁面から 0~30 cm を M_1 、それより中心部の円形断面部を M_2 とした。

Fig. 4a に壁面から 50 cm 離れた部位に浮上した直径 87 cm の連続米粒子群を例示した。液面に浮上し分散する浮上醪の流れにより液面の泡が押し広げられていること、矢印で示すように 3~6 cm の気泡が多

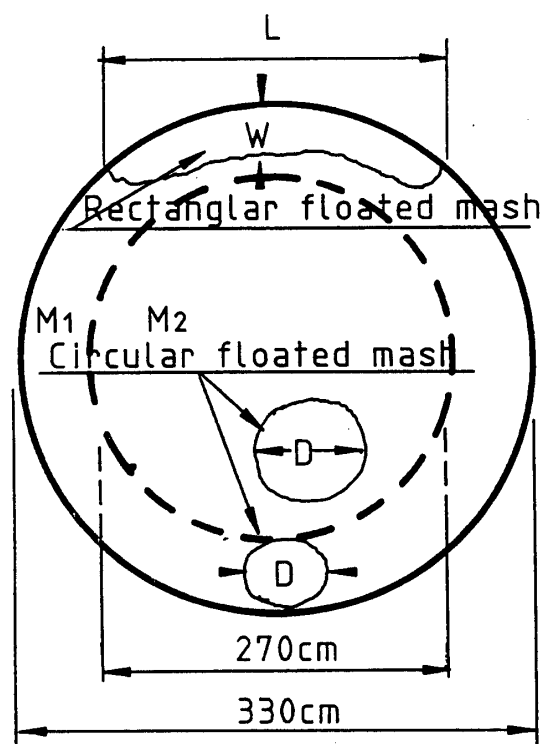


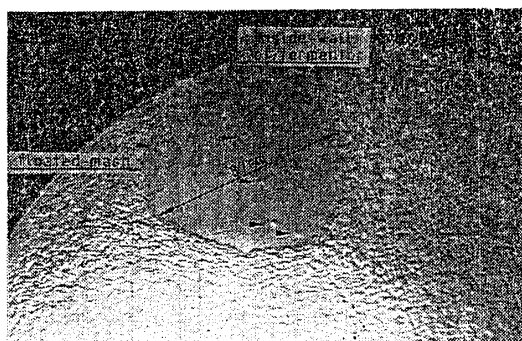
Fig. 3. Schematic view of floated rice-clusters.

Fermentor diameter: 330 cm. Diameter of M_2 zone: 270 cm. L : length of rectangular floated mash. W : width of rectangular floated mash. D : diameter of circular floated mash. M_1 : circular zone near the wall where there is a sharp temperature profile. M_2 : cylindrical zone at center where there is a uniform temperature profile.

箇所が発生していることが観察された。このような気泡は浮上醪の浮上現象が終了する時点の殆んどの場合に観察され、気泡の数は Fig. 4-a に示すように 5 cm 程のものが多数発生する場合と 10 cm 以上の大きな気泡が中央に一個発現して終了する場合とが多かった。Fig. 4-b には壁面に沿って浮上する連続米粒群の一例 ($L=56$, $W=37$ cm) を示した。以下では、Fig. 3 に示すように円形の浮上醪を円形浮上醪、壁面に沿って浮上する長方形の浮上醪を長方形浮上醪と呼ぶこととする。

長方形浮上醪について長さ L 、幅 W および浮上時間を測定し、 L および W について 10 cm 間隔で集計すると、 $L=20, 30, 40, 50$ の全長方形浮上醪に対するそれぞれの発生頻度比率は 11, 34, 25, 21% であり、 $L=30$ の発生頻度が最も多かった。また、 W はいずれの場合も L より小さく、かつ 20~30 cm のもので全

(a)



(b)

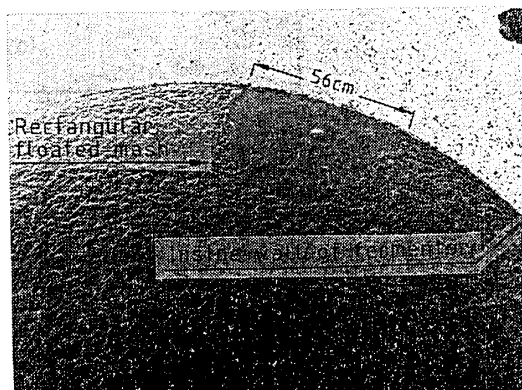


Fig. 4. Pictures of floated rice-clusters.

(a): a circular rice-cluster ($D=87$ cm). At the end flotation, the small bubbles ($D=3\sim6$ cm) of CO_2 gas rose as illustrated in the picture. (b): a rectangular rice-cluster ($L=56$, $W=37$ cm), which floated along the inside-wall of fermentor.

体の 81% をしめた。一方、浮上持続時間は 15~1,320 s の範囲にあり、平均の浮上持続時間は 214 s であった。また、円形浮上醪について直径 D および浮上持続時間を測定し $D=10$ cm 間隔で集計すると、 $D=20, 30, 40, 50$ について全円形浮上醪に対するそれぞれの発生頻度比率は 25, 37, 10, 11% であり、 $D=30$ のものが最も多かった。また、浮上持続時間は 3~3,870 s の範囲にあり、平均浮上時間は 46 s であった。また、特に長時間連続的に浮上したものとしては、円形浮上醪の直径 20 cm, 64.5 min のものが測定された。

各浮上醪の浮上面積とその個数の時間的变化 落泡直後に発生する浮上醪の浮上面積と浮上個数のそれぞれの時間的变化を Fig. 5 に示した。浮上箇所は同時に 2~3 箇所、時には 5 箇所という場合もあり、ま

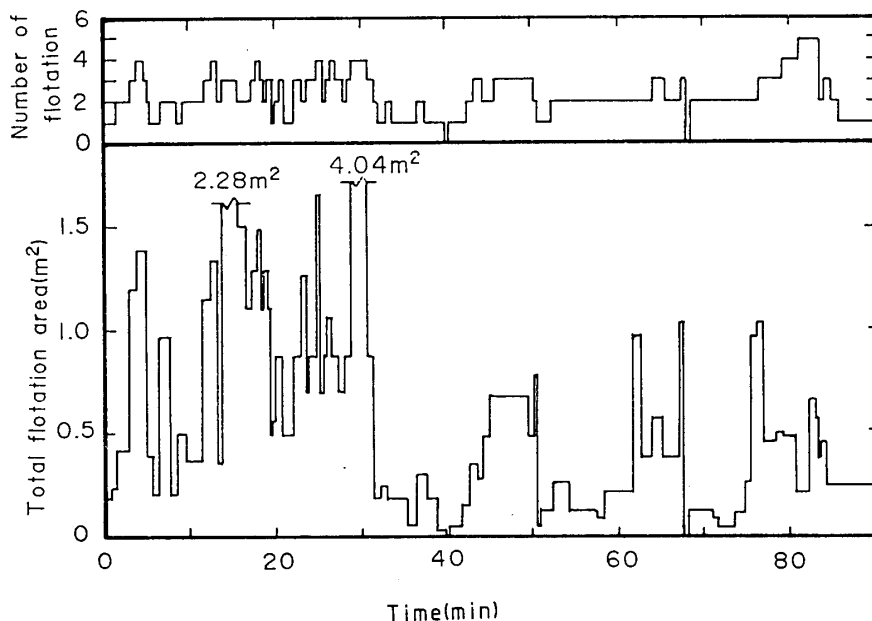


Fig. 5. Variations in the number and the total area of floated rice-clusters during *saké* brewing.

た、浮上面積は図中に示したように大きいときは 2.0 ~ 4.0 m² におよび、発酵槽の全断面積 8.55 m² の約 25~50%に達する場合も観察された。

浮上速度 Fig. 1 に示す醪採取器を発酵 8~11 日目の浮上醪の中心部に設置し、採取器内に採取された醪量より求めた液面での浮上速度を Table 1 に例示した。

ここで、平均浮上速度 V_{av} は次式(1)により求めた。

$$V_{av} = \Sigma(VSi) / \Sigma(Si) \quad (1)$$

ただし、 V , S , i はそれぞれ浮上速度、浮上面積および浮上持続時間である。

壁近傍に沿って上昇する長方形浮上醪の平均浮上速度は 10.1 g/cm²・min、円形浮上醪は 56.2 g/cm²・min であり、円形浮上醪の浮上速度は長方形浮上醪の約 5.6

倍であった。一方、Fig. 2 に示した熱電対温度計を用いて測定した発酵 7 日目における槽壁付近の温度分布の経時変化を Fig. 6 に示す。この図から分かるように温度計 no. 1 で検出される温度の最低値は 14.6°C であり、同軸上の上部に設置されている温度計 no. 5 で検出される温度は、no. 1 で検出される温度とほぼ同じ経過をたどって約 5 min 後に最低値 15.0°C を示している。同様に同軸上に設置されたそれぞれ no. 2 と no. 6, no. 3 と no. 7, no. 4 と no. 8 の温度計で検出される温度の経時変化は約 5 min の時間的ずれを持ってほとんど同じパターンを示している。これらの結果は低温度を示す浮上醪の上昇に起因していると考えられ

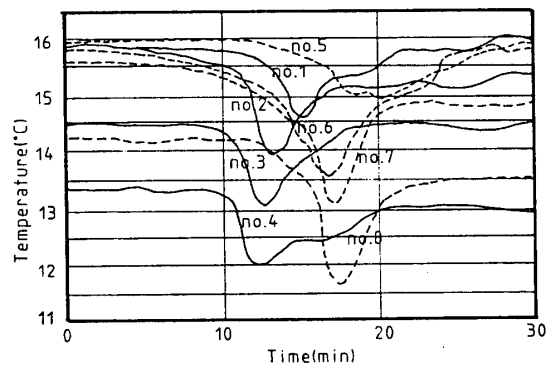


Fig. 6. Changes in mash-temperature profile due to the flotation of rice-cluster at 7 days of fermentation. Numbers: measuring points shown in Fig. 2.

Table 1. Flotation flux of *saké* mash in the deep bed fermentor.

	Rectangular floated mash	Circular floated mash
Ave. flux (g/cm ² ・min)	10.1	56.2
Max. flux (g/cm ² ・min)	11.8	118.7
Min. flux (g/cm ² ・min)	8.3	26.3
Standard deviation	1.17	25.3

る。この結果から計算される浮上速度は 4 cm/min であり、長方形浮上醪の浮上速度の 11.8~8.3 cm/min (醪の比重を 1 g/cm³ とした) に対して 1/2~1/3 と小さな値になった。この理由として温度の測定位置が液面から 6 m と深部であるため発酵ガスによる浮力が小さいことおよび発酵 7 日目であるため醪の流動性が悪いことなどが考えられる。

浮上醪の形状および浮上位置と浮上醪量 長方形および円形浮上醪の各々について次式、

$$\begin{aligned} & \text{浮上醪量} = \text{浮上醪面積} \\ & \times \text{浮上持続時間} \times \text{平均浮上速度} \quad (2) \end{aligned}$$

により浮上醪量を求め、浮上醪の形状および浮上位置との関係について検討した結果、全浮上醪量に対する長方形浮上醪および円形浮上醪の浮上醪量割合はそれぞれ 8.7 および 91.3% であり、また位置 M_1 および M_2 において浮上する醪量は全浮上醪量に対してそれぞれ 28.8 および 71.2% であった。また、 M_1 で浮上する醪量のうち円形浮上醪の割合は M_1 で浮上した全醪量に対して 70% であった。

深さ方向の米粒子濃度分布および浮上醪の米粒子濃度 Fig. 7 に、発酵日数をパラメーターとして、醪

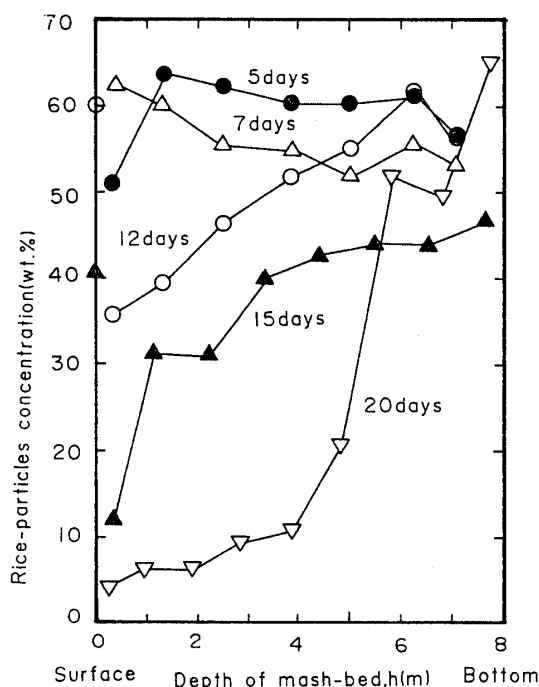


Fig. 7 Concentration profiles of rice-clusters during saké brewing.

Data (○, ▲) on ordinate ($h=0$) indicate concentration of rice particles in floating ricecluster at 12 and 15 days. Number: brewing day.

深さ方向の米粒子濃度分布および浮上醪の米粒子濃度を示した。測定は醪表面から 30 cm 下がった位置より 1 m 間隔で槽底まで行った。Fig. 7 に示すように発酵前期 (5 および 7 日目) における米粒子濃度は、液面より槽底までほぼ均一であり、かつ約 60 wt% という高い値を示した。しかし、12 および 15 日目の発酵中・後期における液面のそれぞれの米粒子濃度は、35.5, 12.0 wt% と槽底部における米粒子濃度 50~62, 40~47 wt% よりかなり低い値を示した。しかるに、この希薄な米粒子濃度の醪内を通して浮上した浮上醪のそれぞれの米粒子濃度は 59.9, 41.1 wt% と各々の槽底部の米粒子濃度にはほぼ等しい濃度であった。このことは浮上醪は米粒子濃度が高い発酵槽底部で発生し、分散することなくそのまま液面まで上昇したことを示している。この現象は前述したように Fig. 6 に示した温度分布の経時変化からも確認された。

浮上醪の浮上現象に対する考察 連続米粒子群の浮上持続時間は平均 45.8 s であったが、特に長時間連続的に浮上したものとして、直径 20 cm の円形浮上醪について 64.5 min のものが観察された。この浮上醪が平均 56.2 g/cm² min で上昇したと仮定すれば、この持続時間の間に 1,140 kg の浮上醪が移動したことになる。一方、この直径 20 cm の浮上面積に相当する浮上醪が最大 8 m 堆積していたとしてその重量は 251 kg であり、上記の移動量はこの値の 4.5 倍に相当する。従ってこのように長時間の浮上現象が持続した理由は、ただ単に浮上面積に相当する浮上醪が発酵槽槽底から上昇するだけでなく、上昇中に周囲の浮上醪を同時に浮上させることに起因すると考えられる。

また、単独米粒子群が頻繁に出現するときは、3 分間に 13 回を数えることもあったが、逆にいずれの浮上醪も 5~10 分間の長時間にわたり全く浮上しない場合もあった。発酵は不連続に行われているとは考えられないため、浮上現象が時間的および場所的にバラツキが生じる原因は、ガスが醪中に蓄積されるまでは醪が浮上しないことおよび醪中に蓄積された炭酸ガスは浮上醪を伴って抜け易い場所から集中的に排出されるためと考えられる。このような現象は、発酵槽において炭酸ガスの排出速度が常に大きく脈動する現象とも一致する。

浮上醪量の経時変化 発酵 9 日から 15 日について浮上醪の形状、大きさ、浮上時間を測定し、各形状に対する平均浮上速度を用い、それぞれの単位時間当た

Table 2. Variance with brewing time of the amount of floated mash per hour.

Brewing time (day)	Flotation rate (kg/h)×10 ⁻³	Flotation ratio (%/h)	Fermentation gas velocity (kl/h)
9	10.752	15.7	16.19
11	7.575	11.8	9.71
15	5.475	8.0	4.86

* Flotation ratio=(flotation rate/total mass of mash (68.4×10³ kg))
×100

りの浮上醪量を求め、その結果を Table 2 に示した。発酵 9 日目における 1 時間当たりの浮上醪量は全醪量の 15.7 wt%, 同様に 11 日目は 11.1 wt%, 15 日目では 8.0 wt% となり、発酵が進行するとともに浮上醪量が減少する結果が得られた。このような浮上醪量の経時変化は、発酵速度および米粒子の自然堆積量が発酵経過と共に次第に減少していくためと考えられる。

深槽発酵槽内の流動モデル 以上の結果を総合的に考察した結果、落泡（発酵 12 日目）以後の清酒醪の流動は、Fig. 8 の模式図によって説明できると考えられる。

一般に、槽内は単独の米粒子が自由沈降または干渉沈降状態にある層域 A と米粒子が自然堆積状態にある層域 B とに大別できる。A 層で発生した炭酸ガスは、

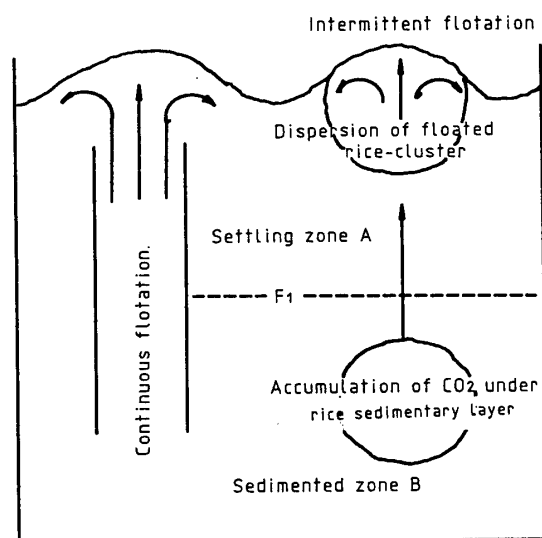


Fig. 8. Schematic view of floating mash in large-scale deep fermentor. Horizontal line marked (F1) represents a boundary layer between settling zone and sedimented zone of rice-particles.

A 層の米粒子濃度が小さいために、米粒子間に蓄積されることなく気泡として米粒子間を上昇する。通常、炭酸ガスは槽内の全ての位置ではほぼ均一に発生すると考えられるため、A 層で発生し上昇する炭酸ガスの気泡はマクロ的流動には寄与しないと考えられる。一方、層域 B では米粒子が密に堆積しているため、この層域で発生した炭酸ガスは、通常、米粒子間あるいは堆積層下部に蓄積される。いま、上昇しようとしている米粒子群を仮想すると、その米粒子群は内部に蓄積した炭酸ガスの浮力が周辺部の醪から受ける抵抗力より大きくなったときに、上部の米粒子を押し開きあるいはピストンのように醪を押し上げつつ上昇を始める。1 個の大集団として上昇する場合が単独米粒子群であり、最初に上昇した米粒子群によって一種の流路が形成され、そのまま流路を通して他の醪も連続的に上昇する場合が連続米粒子群である。上昇した米粒子は醪表面で炭酸ガスを放散して浮力を失いやがて単独の米粒子となって沈降する。米粒子の浮上はこのような米粒子群の上昇に伴って起こり、米粒子群の発生位置は発酵の進行とともに移動する。一方、米粒子の沈降は槽全体でゆっくりと進行する。発酵中期以前の醪は槽上部に米粒子濃度の希薄な層域 A が存在しないため、Fig. 8 に示す層域 B が液面まで槽全域をしめると考えられる。以上に述べた流動機構の解析に必要な流動抵抗については続報で述べる。

要 約

深槽発酵における清酒醪の流動現象を明らかにするために、直径 3.3 m、醪深さ 8.0 m の発酵槽における醪の浮上現象を測定し次の結果を得た。

1. 槽内の醪の流動は、米粒子堆積部で発生した発酵ガスの浮力によって米粒子群が醪表面へ浮上するこ

とによって引き起こされる。

2. 醪の浮上現象は断続的に起こる場合と連続的に起こる場合の2種類がある。

3. 槽壁付近を上昇する醪は長方形であり、その大きさは長さが約30, 幅が 20~40 cm のものが多く、その最小および最大浮上速度はそれぞれ8.3および11.8 g/cm²・min であり、平均浮上速度は10.1 g/cm²・min であった。槽中心部付近で発生する浮上醪は円形を示し、直径 30 cm のものが最も多く、その最小および最大浮上速度は、それぞれ26.3および 118.7 g/cm²・min であり、平均速度は 56.2 g/cm²・min であった。発酵9日目、11日目および15日目の1時間当たりの浮上醪量は、それぞれ全醪量の15.7, 11.1および8.0 wt% を示し、発酵の進行とともに浮上醪が減少する結果が得られた。

謝 辞

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故田口久治教授ならびに同学部吉田敏臣教授に謹んで感謝いたします。

また、本研究の実験施設を提供いただいた株式会社山忠新家に感謝するとともに、本研究の遂行にあたり、共に研究していただいた木村與司雄氏に感謝いたします。

文 献

- 1) 高松 智, 菅 健一, 上田隆蔵, 田口久治: 醸工 49, 472(1971).
- 2) 永谷正治: 醸工, 49, 674(1971).
- 3) 永谷正治: 醸工, 51, 35(1973).
- 4) Delente, J., Akin, C., Krabb, E., Ladenburg, K.: Biotechnol. Bioeng., 11, 631 (1967).
- 5) 井上 繁, 奥村幸正, 吉栖 肇, 寺島 豊: 醸工 43, 53(1965).
- 6) 井上 繁, 吉栖 肇, 寺島 豊: 醸工, 44, 101 (1966).
- 7) 井上 繁, 吉栖 肇: 醸工, 49, 946(1971).
- 8) 井上 繁, 吉栖 肇: 醸工, 49, 952(1971).
- 9) 柴田正人, 徳村治彦, 深谷伊和男, 大倉鎮夫, 山田鍾美, 秋田利彦: 醸酵工学, 57, 459(1979).
- 10) 日本薬学会編: 衛生試験法注解, 736, 金原出版, 東京 (1965).
- 11) 柴田正人: 醸酵工学, 57, 445(1979).

(昭63. 2. 19受付)