

自動蒸留システムの構築に関する研究

食品工業部 安藤浩毅, 瀬戸口真治, 上山貞茂, 亀澤浩幸, 濱崎幸男

Automatic Distillation System for Honkaku-Shōchū

Hiroki ANDO, Shinji SETOGUCHI, Sadashige UEYAMA, Hiroyuki KAMEZAWA, and Yukio HAMASAKI

本格焼酎の蒸留工程における完全自動化を目的として、アルコール蒸留曲線に着目した自動蒸留システムの構築を行った。本システムにおいてアルコール濃度は振動式密度計を用いることによって国税庁規格型酒精計と遜色ない測定ができた。これにより、アルコール濃度の値をコンピュータに入力可能となり、蒸気供給量をコンピュータ制御してアルコールの流出速度を変化させることが可能となった。また、この結果は従来の蒸留システム（蒸気圧の制御、製品の温度制御等）と併用することにより更に画期的なシステムとなることが考えられる。

1. 緒言

本格焼酎において、微量に含まれる高級アルコール類及び脂肪酸エステル類といった香味成分は官能評価に大きく影響する。製品中の香味成分の含有量は、原料処理、製麹、発酵工程等、それぞれの工程において取り扱う原料や管理によって影響を受けるが、蒸留工程もそのかぎりではない。特に、蒸留機の構造及び蒸留操作条件等の差異によって酒質が大きく異なると言われている。また、礎ら¹⁾は蒸留における微量成分（香味成分）の留出挙動がアルコール蒸留曲線（以下、蒸留曲線とする）の挙動に対応しているが、微量成分の蒸留曲線は操作の変動の影響を鋭敏にうけると報告している。

そこで本研究では、蒸留曲線を蒸留の指標として、蒸気供給量をコンピュータ制御する新しい自動蒸留システムの構築を行ったので報告する。

なお、本システムで述べる蒸留曲線は、縦軸にアルコール濃度 [v/v %]、横軸に時間 [h] で表し、アルコール濃度は主成分であるエタノール濃度のこととする。

2. 実験及び方法

2.1 アルコール濃度連続測定装置の開発

2.1.1 アルコール濃度の測定

アルコール濃度測定には横河電機(株)製の振動式密度計DM 61（以下、密度センサーとする）及び、NEC(株)製のパソコン（PC-9801vm）（以下、パソコンとする）を用いて行った。すなわち、密度センサーを用いてアルコール水溶

液の密度を測定した後、パソコンを用いて15℃におけるアルコール濃度に換算した。換算方法は化学便覧²⁾を用いて行い、更に、国税庁規格型酒精計（以下、酒精計とする）によるアルコール濃度測定法を応用して行った。すなわち、任意温度におけるアルコール濃度を測定した後、国税庁の酒精温度換算表³⁾を用いて15℃におけるアルコール濃度に換算した。Table 1に従来より用いられている密度からアルコール濃度へ換算する方法と任意温度の密度から15℃におけるアルコール濃度へ換算する方法の比較したものを示した。

Table 1（密度→アルコール濃度）換算方法の比較

従来の換算方法	自動蒸留システムにおける換算方法
密度（任意温度） [g/cm ³]	密度（任意温度） [g/cm ³]
↓	↓
15℃恒温に保つ	比重 (d _{15.56} ^{任意温度}) [-]
↓	↓ ←化学便覧を引用
15℃の密度 [g/cm ³]	↓
↓	任意温度におけるアルコール濃度 [v/v%]
↓	↓ ←国税庁規格型酒精計温度換算表
比重 (d ₁₅ ¹⁵) [-]	↓
↓ ←化学便覧を引用	↓
15℃におけるアルコール濃度 [v/v%]	15℃におけるアルコール濃度 [v/v%]

2. 1. 2 アルコール濃度連続測定に及ぼす温度変化の影響

アルコール水溶液の温度変化に対する密度センサーの精度について検討した。アルコール濃度として約60 v/v % (v/v % = 体積分率 × 100) に調製したエタノール水溶液の温度を26.2℃の一定温度から毎分1.25℃で約33.7℃まで上下に温度変化させた時のアルコール濃度を密度センサーで測定した。その時の実験装置図を Fig. 1 に示した。

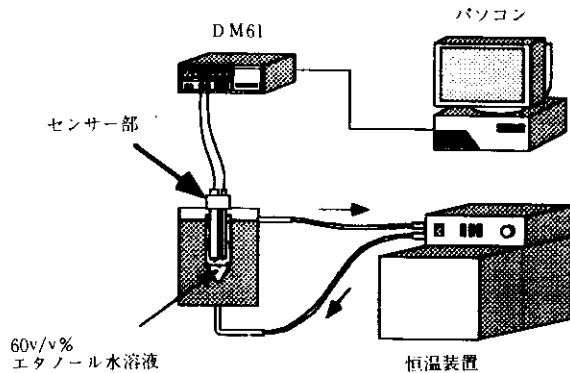


Fig. 1 実験装置 1

2. 1. 3 アルコール濃度連続測定に及ぼす流速変化の影響

アルコール水溶液の流速変化に対する密度センサーの精度について検討した。アルコール濃度として約30 v/v % エタノール水溶液の温度を一定に保ち、古江サイエンス(株)製のローラーポンプを用いて流速を0.85~9.09 ml/s の範囲で変化させた時のアルコール濃度を密度センサーで測定した。その時の実験装置図を Fig. 2 に示した。

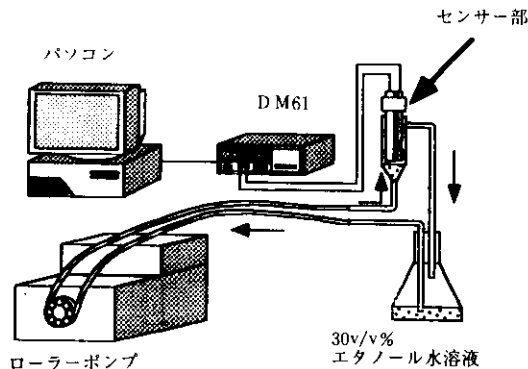


Fig. 2 実験装置 2

2. 1. 4 密度センサーの性能評価

密度センサーの性能評価として酒精計との比較により行った。Fig. 3 に示した100ℓ仕込みの単式蒸留機を用いて焼酎もろみを蒸留し、留出液を分割採取後、密度センサー及び酒精計でそれぞれの区分のアルコール濃度を測定し比較した。

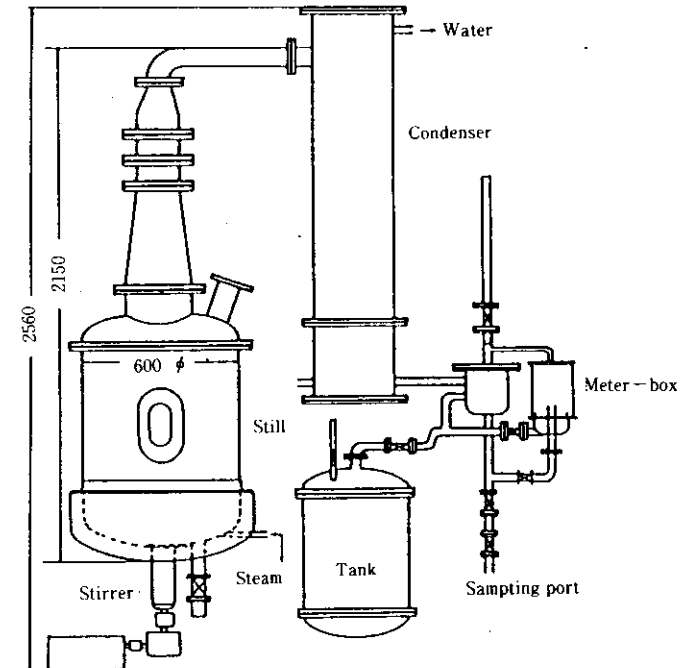


Fig. 3 単式蒸留機

2. 2 自動蒸留システムの蒸留試験

2. 2. 1 自動蒸留制御方法

Fig. 4 に本制御システムの概要を示した。本システムは、密度センサー、横河電機(株)製のプログラム調節計 UP 25 (以下、UP 25 とする) 及び指示調節計 UT 35 (以下、UT 35 とする)、山武ハネウェル(株)製の蒸気バルブから構成され、それぞれ各種ケーブルによりパソコンと連動し、アルコール濃度と蒸気供給量とのフィードバック制御で行った。

自動制御方法は、まず密度センサーで測定した密度をパソコンを用いてアルコール濃度に換算し (Table 1), 次に UP 25 を用いてこの値と標準の蒸留曲線データと比較を行い、PID (比例+微分+積分) 制御により最適な蒸気供給量を設定し、最後に UT 35 でその設定値に基づいた蒸気バルブの制御を行った。

なお、UP 25 及び UT 35 にはあらかじめ標準となる蒸留曲線のデータ及び蒸気バルブの初期弁開度を設定し、す

すべての制御状態をパソコンのモニター上で監視できるようにした。

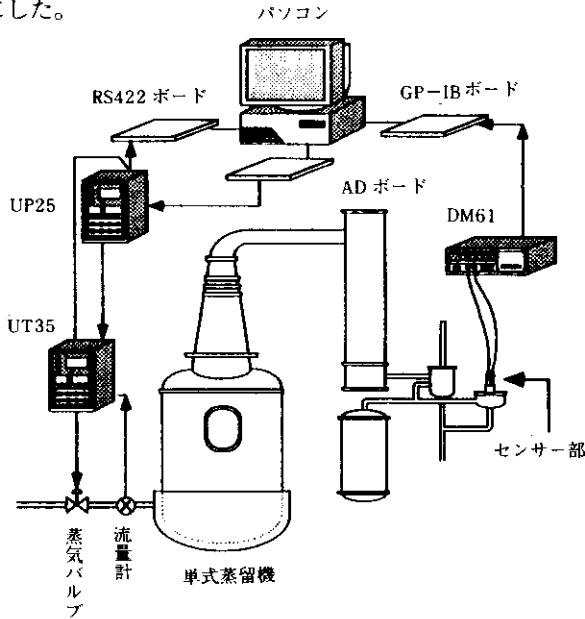


Fig. 4 自動蒸留制御システムの概要

2. 2. 2 自動蒸留試験

蒸気供給量の変化に応答する蒸留曲線の変化を検討するために、Table 2の条件で実験を行った。また、その時の

Table 2 実験条件

Run No.	蒸気供給量 [kg/h]
Run No.1	20
Run No.2	30
Run No.3	15
Run No.4	15→20→30
Run No.5	30→20→15
Run No.6	制御値

蒸留初期条件を Table 3 に示した。すなわち、Run No.1, 2 及び 3 は一定蒸気供給量で、Run No.4 は蒸気供給量を 15kg/h から 20kg/h, 30kg/h と 30分毎に増加させ、Run No.5 は逆に蒸気供給量を 30kg/h から 20kg/h, 15kg/h と減少させて蒸留を行った。また、Run No.6 では Run No.4 及び 5 の結果より Table 4 に示すような UP25, UT35 の PID パラメータ及び蒸気供給量の上限、下限等を設定し、蒸留曲線の制御をさせて運転を行った。

なお、この時の蒸留初期条件は、Run No.1~6 においてすべて統一とし、仕込み液は焼酎もろみのアルコール濃度とほぼ同じ 12 v/v % に調製したエタノール水溶液を使用した。蒸気圧 (ゲージ圧) は、12 v/v % のエタノール水溶液の沸点 88℃ に到達するまで 0.20kg/cm² に保ち (その時の蒸気バルブの弁開度が 100% で蒸気供給量は ≥50kg/h)、その後、蒸気圧を 0.11kg/cm² に下げた (その時の蒸気バルブの弁開度が 100% で蒸気供給量は 35kg/h)。また、自動制御は、メートルボックス部の密度センサーが留出液の密度を感知した時点を制御開始とし、エタノール濃度が 15 v/v % となった時点を蒸留終了とした。

Table 3 蒸留初期条件

・仕込み初濃度	12 [v/v %] (9.8 [wt %])
・仕込み液量	100 [kg]
・初期蒸気圧	0.20 [kg/cm ²]
蒸気供給量の弁開度	100 [%]
蒸気供給量	≥50 [kg/h]
・蒸気圧の切り換え温度	88 [°C]
・蒸気圧	0.11 [kg/cm ²]
蒸気バルブの初期弁開度	50 [%]
蒸気供給量	35 [kg/h]
・垂れ始めの蒸気供給量	15~30 [kg/h]
・製品温度	約 18 [°C] (冷却水温と同じ)
・最終アルコール濃度	15 [v/v %]

Table 4 UP25, UT35 の制御設定値

設定項目	UP 25	UT 35	UP 25に投入した標準アルコール濃度		
			セグメント ^{a)} No.	目標濃度 [v/v %]	蒸留時間 [h]
PB [%]	100	150			
I [s]	60	10			
D [s]	60	0			
OH [%]	60.0 ^{a)}	100.0			
OL [%]	20.0 ^{b)}	0.0			
			1	60.0	0.00
			2	65.0	0.05
			3	46.5	0.50
			4	45.0	0.58
			5	37.0	1.00
			6	36.5	1.10
			7	15.0	2.00

^{a)} 蒸気供給量の 30 [kg/h] に相当

^{b)} 蒸気供給量の 10 [kg/h] に相当

^{c)} 蒸留曲線上の設定ポイント

3. 結果及び考察

3. 1 密度センサーの評価

3. 1. 1 アルコール濃度連続測定に及ぼす温度変化の影響

密度センサーの精度に及ぼすアルコール水溶液の温度の影響を検討した結果を Fig. 5 に示した。温度変化に影響なくほぼ一定濃度であることから温度変化の影響はないことがわかった。このことは、一定アルコール濃度では、溶液の温度変化にたいして、Table 1 の国税庁規格型酒精計温度換算表に基づいた処理が確実に機能していることがわかった。

3. 1. 2 アルコール濃度連続測定に及ぼす流速変化の影響

密度センサーの精度に及ぼすアルコール水溶液の流速の影響を検討した結果を Fig. 6 に示した。流速を変化させても温度を変化をさせた時と同様アルコール濃度は一定に保たれ、ほとんど影響がないことがわかった。

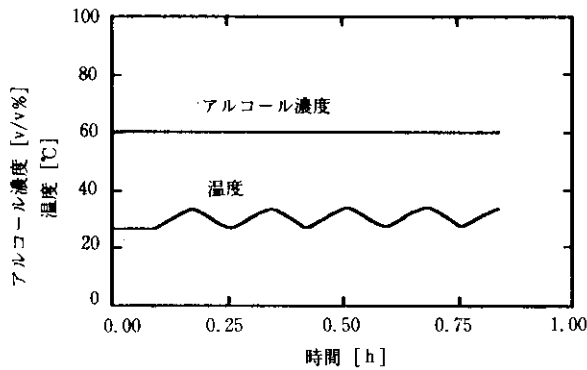


Fig. 5 アルコール濃度連続測定における温度変化の影響

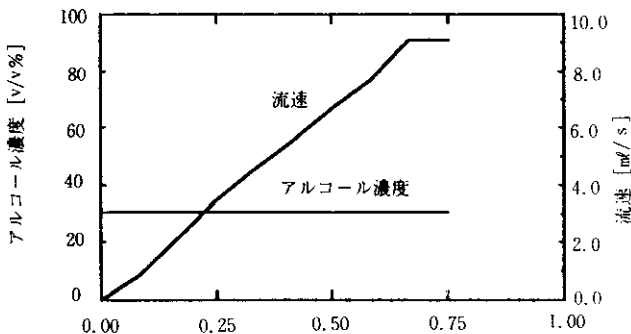


Fig. 6 アルコール濃度連続測定における流速変化の影響

3. 1. 3 密度センサーによるアルコール濃度連続測定

密度センサーのアルコール濃度連続測定装置への適性試験を行った。Fig. 7 は蒸留試験を行った際の分割採取液を密度センサー及び酒精計で測定した値をそれぞれ蒸留曲線形で示した。0～100度の濃度幅と濃度差とではスケールが異なりほとんどその違いが認められないので酒精計基準の差も同図に示した。また、Fig. 8 では酒精計基準の比で表した。全アルコール濃度領域においてばらつきはあるものの酒精計と比較して差が ± 0.5 v/v %以内にとどまり、精度は ± 4 %であった。このことより、今回用いた密度センサーは、酒精計と遜色なくアルコール濃度を連続的かつ精度良い測定が可能であることがわかった。

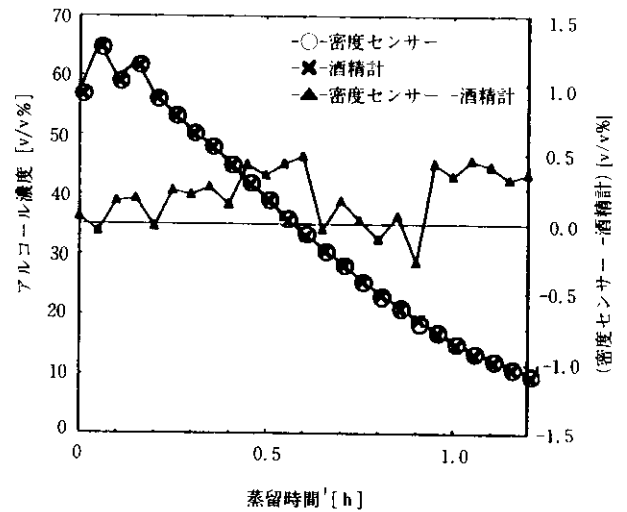


Fig. 7 密度センサーと酒精計の比較 (1)

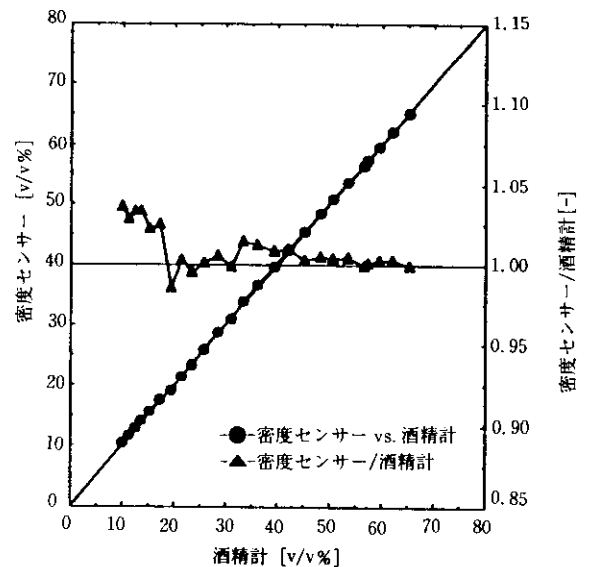


Fig. 8 密度センサーと酒精計の比較 (2)

3. 2 自動蒸留システムの運転試験

蒸留曲線の蒸気供給量の変化に対する応答性について検討した結果を Fig. 9~12 に示した。Fig. 9 は、それぞれ垂れ始め（メートルボックス部の密度センサーがアルコール密度を感知した時点）から一定の蒸気供給量で蒸留を行った場合の蒸留曲線を示した。Run No. 3 は蒸留垂れ始めに外部から何らかの振動によるセンサーの誤作動が見られたが、アルコール濃度はほぼ直線的に変化することがわかった。このように蒸気供給量を変化させるとそれぞれの傾きで蒸留が行われることがわかった。

次に蒸気供給量を3段階に変化させた時、蒸留曲線の傾きの違い及び応答性を Fig. 10, 11 に示した。Fig. 10 は蒸気供給量を30分毎に増加させたものであり、Fig. 11 は蒸気供給量を30分毎に減少させたものである。蒸気供給量は設定値の変化に対して2~3分程遅れて追従するが、蒸留曲線が応答するのには5~6分程要することがわかった。

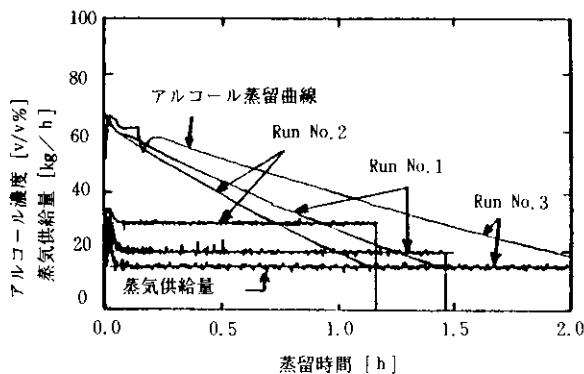


Fig. 9 一定蒸気供給量に対するアルコール蒸留曲線の差異

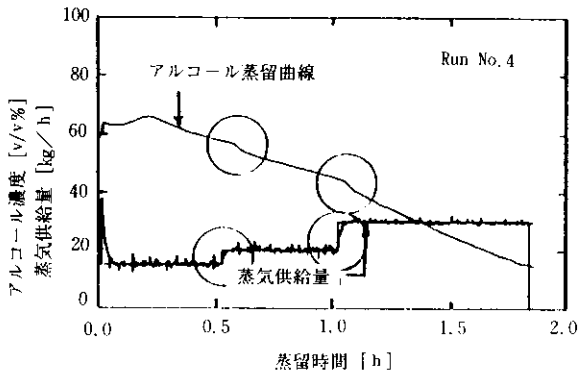


Fig. 10 蒸気供給量の増加に対するアルコール蒸留曲線の応答性

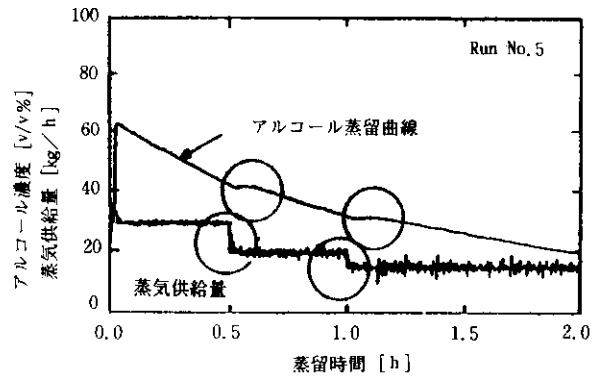


Fig. 11 蒸気供給量の減少に対するアルコール蒸留曲線の応答性

以上の応答性をもとに Run No. 6 で蒸留曲線の制御をさせて運転を行った結果を Fig. 12 に示した。この結果より、蒸気供給量の変化に応答しながら標準の蒸留曲線に追従した制御が行われることがわかった。0.8時間辺りから蒸気供給量の下限に差し掛かり、制御されないままの状態にあったが、これは蒸気供給量が零になることによる蒸留の停止を避けるためのリミッターとしての役割を果たしたもので制御上の問題ではなかった。今回は、この下限を10kg/h にしたが最適値とは言えないと考えられた。また、PID の設定値においても同様のことが言え、今後最適な設定値を検討する予定である。

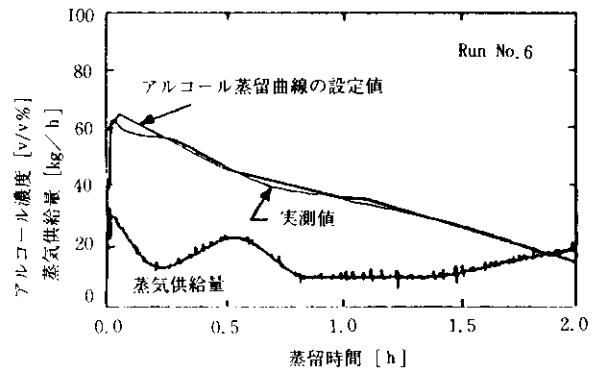


Fig. 12 アルコール蒸留曲線の制御結果

4. 結 言

本研究では、アルコール蒸留曲線を蒸留の指標として、蒸気供給量をコンピュータ制御する自動蒸留システムの構築を行った。システムの開発に先立ち、まず、酒精計に代わるアルコール濃度連続測定装置の開発を行った。本装置

により、温度変化、流量変化に影響なく、任意温度の密度から15℃におけるアルコール濃度の測定が可能となった。また、密度センサーの性能としては酒精計に比べ ± 0.5 v/v %以内にとどまり、精度として ± 4 %であることから酒精計と遜色の無いものであることがわかった。次に本装置を用いてアルコール蒸留曲線と蒸気供給量のフィードバック制御を行うことにより、アルコール蒸留曲線を制御することが可能となった。今後更に研究を進め、本格焼酎の蒸留

システムの完全自動化を確立することにより、酒質の安定化、製品の多様化が図られるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 碓醇：化学工学論文集，17，1，22～28 (1991)
- 2) 日本化学会編：“化学便覧(基礎編)”，丸善 (1966)，p. 462～463
- 3) 芝田喜三：“酒精温度換算表”，東京百木製作所(1958)