

アルコールの高濃度連続生産システムの開発に関する研究

- 連続減圧蒸留技術の開発について -

食品工業部

江口良寿

材料環境部

福元 豊 円城寺隆志

バイオエタノールの高効率生産技術の開発を目的として今年度は連続処理可能な減圧蒸留装置を試作して、その性能について検討を行った。本蒸留装置は原料（発酵もろみなど）とアルコール蒸気が対向するよう設計しており、これにより理論段数を向上させることができる。本装置を用いて水-エタノール系で実験したところ、滞留時間1分で20%のエタノール溶液から40～60%のエタノール溶液を得ることが可能であった。

1. はじめに

世界的な環境問題の顕著化により、環境負荷の少ない再生可能なエネルギーの研究開発が活発化している。その中でも、農産物や農産廃棄物、廃木材などを原料としたバイオエタノールは世界的に研究開発や実証試験が行われている。現在行われている研究としては、木質系バイオマスの高効率な糖化、C5糖（キシロースなどの炭素数5の糖）発酵性微生物の育種、遺伝子組み換え細菌による高効率アルコール発酵などの技術開発やエネルギー作物としての農産物の開発などが挙げられる。

このような動きは全国的に広がっており、（独）産業技術総合研究所や大手プラントメーカーを中心とした木質系バイオマスからのバイオエタノール製造をはじめとして、コメ、小麦、こうりゃんなどの農作物や糖蜜からのエタノール製造・実証試験が進められている。

現在実施されているアルコール発酵では、酵母を用いて10%程度のアルコールを製造し、これを蒸留して90%以上のバイオエタノールを製造している。しかしながら、この製造方法では発酵によって得られるアルコール濃度が低いため、発酵装置や蒸留装置、廃水処理施設が大きく、発酵・蒸留・廃水処理に関する投与エネルギー量が膨大になる問題がある。この問題を解決するには、発酵により得られる発酵もろみのアルコール濃度を高くする必要がある。そのためには発酵原液の糖濃度を高める必要がある。しかしながら、糖濃度を高くすると高糖圧迫により酵母が発酵阻害を受けるため、単発酵で14%以上のアルコールを得ることは困難となっている。

一方、清酒醸造では低温での発酵という制限はあるものの、清酒醪（もろみ）では18～20%のアルコー

ルが製造されている。これは清酒醸造が並行複発酵と呼ばれるデンプンの液化・糖化とアルコール発酵が醪中で同時に進行する発酵形態であるために、醪中の糖濃度は発酵期間中1～2%程度に抑えられ、酵母が高糖圧迫を受けずにアルコール発酵できるためである。このような並行複発酵のメカニズムが知られているにもかかわらず、現在でも一般的なアルコール発酵によってバイオエタノールが製造されているのは、並行複発酵による高濃度アルコール発酵が低温で行われることで発酵期間が長くなり、発酵システム全体としては発酵効率が悪いためである。また、現在の並行複発酵はデンプン質でのみ実施可能であり、糖蜜や廃木材等を原料として糖化した原料については実施できないことも一要因であった。

昨年度までの研究においてわれわれは並行複発酵を擬似的に再現することでエタノール濃度が18%の高濃度アルコールを製造可能な技術を開発した。しかしながら、燃料用バイオエタノールとして利用するためには発酵もろみを濃縮する必要がある。これまで開発されている濃縮技術には蒸留法やパーペーパレーション法、超音波霧化分離法などがあるが、それぞれに長短がある。

そこで、本研究では連続処理ができる減圧蒸留器を試作し、その性能について水-エタノールモデル系で検討を行った。

2. 実験方法

2.1 蒸留装置

試作した蒸留装置の概略図を図1に示す。原料の発酵もろみ等のアルコール溶液は送液ポンプ3によってaから内管に供給され、重力によって蒸留セル4の下部へと流れていく。蒸留セル4の最下部まで到達した

溶液はポンプ2によってbから排出されるが、この間に原料溶液中のアルコールは蒸発し、cから供給される空気によって原料溶液の流れに対向して蒸留セルの上部へと流れ、dから排出されてコンデンサー5で凝縮し、液体エタノールとして回収される。回収容器8から蒸留セル4の内管までは真空ポンプ1と送液ポンプ2、3及び調圧コック10によって減圧状態が保たれるよう設計した。

2.2 蒸留実験

エタノール 50ml を水で 250ml とした 20% エタノール水溶液を図1の原液タンクに入れ、図1の送液ポンプ3を用いて図1の蒸留セル4に供給した。蒸留セルに原料エタノール水溶液が入ってから排出部に到達するまでの時間を計測し、この時間を滞留時間とした。また、図1の送液ポンプ2の速度は排出部に若干の処理液が残存する状態を維持した。蒸留温度は水とエタノールの共沸点温度の 80℃ として、減圧度合いを変化させて蒸留効果について検討を行った。蒸留後、蒸留液と廃液の容量及びエタノール濃度を測定して、エタノールの濃縮効果及び回収率を求めた。

2.3 アルコール分析

蒸留液及び廃液のアルコール濃度は株式会社島津製作所製ガスクロマトグラフィー GC-A9 による FID 検出器を用いた絶対検量線法で測定した。

3. 結果及び考察

3.1 減圧度 -0.062MPa における蒸留

エタノール濃度を 20% として、減圧度を -0.062MPa としたときの蒸留結果を表1のNo.1に示した。-0.062MPa では水の沸点が蒸留温度より低い 75℃ となることから、回収される蒸留液のエタノール濃度が

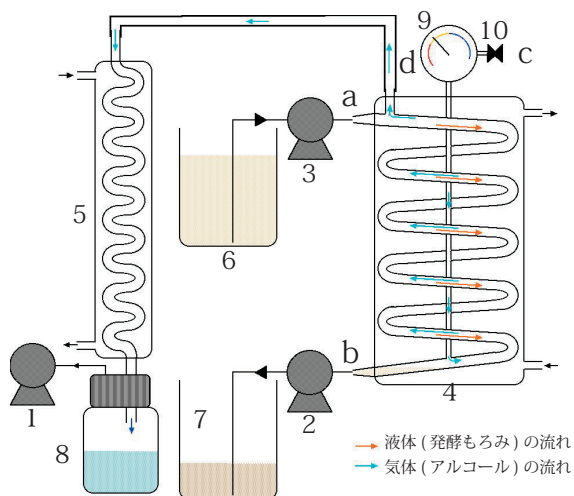


図1 試作した蒸留装置の概略図

1: 真空ポンプ, 2, 3: 送液ポンプ (P-1), 4: 蒸留セル (試作物), 5: コンデンサー, 6: 原液タンク, 7: 廃液タンク, 8: アルコール回収容器, 9: 減圧ゲージ, 10: 調圧コック

高くならなかったが、廃液中のエタノール濃度は 0.4% と低く、エタノール回収率も 97% となった。しかしながら、この条件では図1の送液ポンプ2の能力が低いために、処理液を排出することができなかった。そこで、図1の蒸留セル4下部に処理液が溜まったところで減圧を解除して処理液を排出後、さらに蒸留を行った。そのため、この減圧度で連続処理を行うためには、高い減圧度でも使用可能なポンプが必要であることがわかった。

3.2 減圧度 -0.053MPa における蒸留

-0.062MPa における蒸留実験では連続処理出来なかったことから、減圧度を -0.053MPa に低下させて同様の実験を行った。その結果を表1のNo.2に示す。この条件での水の沸点は 80℃ となり、蒸留温度と一致している。滞留時間は 53 秒で、250ml の原料を処理するのに要した時間は約 23 分と短時間で処理を完結することができた。エタノール回収率は 96.5% と目標の 95% を達成することができた。また、廃液中のエタノール濃度は 0.5% であった。しかしながら、蒸留液のエタノール濃度は 47.3% と原料に対して約 2 倍にしか向上しないことがわかった。これは減圧度が高く、水の蒸発量が多くなりすぎているためであると考えられた。

3.3 減圧度 -0.043MPa における蒸留

減圧度が高いと蒸留されるエタノールの濃縮効果が低くなることが予測されたため、減圧度を -0.043MPa に低下させて蒸留した結果を表1のNo.3に示す。この条件での水の沸点は 85℃ となり、蒸留温度よりも高くなることから、エタノールの濃縮効果は高くなりエタノール濃度は 60% となった。しかしながら、廃液中のエタノール濃度が若干上昇していることから、エタノール回収率は 92% 程度に低下することがわかった。



図2 蒸留実験の様子

表1 蒸留実験結果

原料液量：250ml, 蒸留温度：80℃

	No.1	No.2	No.3	No.4
減圧度 (MPa)	-0.062	-0.053	-0.043	-0.035
エタノール濃度 (%)	20.1	20.2	20.0	20.0
蒸留温度 (℃)	80	80	80	80
回収液量 (ml)	120	103	76.2	69
回収液アルコール濃度 (%)	40.7	47.3	60.5	63.5
廃液量 (ml)	125	143	173.8	176
廃液アルコール濃度 (%)	0.4	0.5	0.8	1.5
滞留時間 (秒)	52	53	57	62
処理時間 (分)	23.0	23.0	35.2	41.5
アルコール回収率 (%)	97.1	96.5	92.2	87.6

3.4 減圧度 -0.0345MPa における蒸留

さらに減圧度を -0.0345MPa に低下させたときの蒸留結果を表1のNo.4に示した。この条件における水の沸点は88.5℃であり、さらにエタノールの濃縮効果が高くなったが、-0.043MPaと比較してその効果の向上は大きいものではないことがわかった。しかも、この条件では廃液中に1.5%のエタノールが存在し、回収率は90%以下に低下した。

3.5 エタノール濃度 10% における蒸留

これまで原料として20%のエタノール水溶液を用いてきたが、この濃度でのエタノール濃縮効果は約3倍とそれほど高いものではなかった。一方、通常の発酵もろみのアルコール濃度は10%前後であることから、原料として10%のエタノール水溶液を用いて実験した結果を表2のNo.1に示す。エタノール濃度が10%でもエタノール濃縮効果は約3倍であり、20%エタノール水溶液と効率が変わらないことがわかった。そのため、本システムの濃縮効果は約3倍と考えられる。

以上の結果から、本システムでは短時間で処理出来るものの、エタノール濃縮効果は高くないためにさらに高いエタノール濃度の粗留アルコールを得るためには複数回の処理が必要であると考えられた。

3.6 エタノール濃度 50% における蒸留

これまでの実験で、本システムのエタノール濃縮効果は約3倍であることがわかったため、高濃度のエタノール溶液を得るためには複数回の処理が必要である。そこで、原料エタノール溶液の濃度を約50%として蒸留した結果を表2のNo.2に示す。原料のエタノール濃度を50%とすることで、74%の粗留アルコールが得られたが、エタノール濃縮効果は1.4倍とさらに低下した。また、廃液中のエタノール濃度も2.6%と高くなった。しかしながら、回収率は98.1%と低濃度エタノールを原料とした場合とほとんど変わらなかったことから、本システムの効率は高いと考えられた。

表2 蒸留実験結果

原料液量：250ml, 蒸留温度：80℃

	No.1	No.2	No.3
減圧度 (MPa)	-0.053	-0.053	-0.062
エタノール濃度 (%)	10.0	51.2	62.2
蒸留温度 (℃)	80	80	80
回収液量 (ml)	81	170	192
回収液アルコール濃度 (%)	30.4	73.9	77.7
廃液量 (ml)	165	79.0	57.8
廃液アルコール濃度 (%)	0.4	2.6	8.9
滞留時間 (秒)	65	66	62
処理時間 (分)	22.8	23.0	20.6
アルコール回収率 (%)	97.7	98.1	95.9

3.7 エタノール濃度 60% における蒸留

減圧度 -0.053MPa で50%程度のエタノール溶液を原料に用いると廃液中のエタノール濃度が高くなることから、減圧度を -0.062MPa に高めて60%エタノール溶液の蒸留について検討を行った結果を表2のNo.3に示す。原料のエタノール濃度が60%を超えても得られる粗留アルコールのエタノール濃度は80%未満で、エタノール濃縮効果は50%溶液を用いたよりさらに低下した。また、減圧度を高めたにもかかわらず、廃液中のエタノール濃度は9%とさらに高くなった。そのため、本システムでは70%程度のエタノール濃度の粗留アルコールまでしか生産出来ないものと考えられた。しかしながら、本システムでの回収率が95%を超えることと、短時間で処理出来ることから、蒸留時のエネルギー投入量を削減出来るものと考えられた。

4. おわりに

連続処理が可能な蒸留装置を試作した。本システムでは1分程度の滞留時間の処理でアルコール溶液を約3倍の40～60%に濃縮可能であることから、蒸留時の投入エネルギー量を削減出来るものと考えられる。今回の実験では複数回の処理でも80%以上のエタノール濃度の粗留アルコールを得ることはできなかったが、気液平衡における共沸点を消失させるには溶液に第3成分として塩を混入する方法¹⁾があることから、発酵もろみを用いた蒸留においては80%以上の濃度のアルコール溶液を得られる可能性もある。また、本システムはパーペーレーション法²⁾などと組み合わせることにより、高効率でバイオエタノールの製造が可能になるものと考えられる。

参考文献

- 1) Nishi, Y: J. Chem. Eng. Japan, 8, 187 (1975)
- 2) Kokugan, T. et al.: J. Chem. Eng. Japan, 31, 153 (1998)