

## 〈研究発表〉

### 水素メタン発酵による焼酎粕処理・エネルギー回収システムの開発

河野 孝志<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 株式会社タクマ 技術開発部 (〒660-0806 尼崎市金楽寺町 2-2-33, E-mail: kawa@takuma.co.jp)

#### 概要

焼酎粕の保有エネルギーを効率よくバイオガスに変換し、エネルギー利用するシステムの開発を進めてきた。芋焼酎粕、麦焼酎粕を受け入れ、長期間にわたって安定処理ができた。また、エネルギー回収率は、麦焼酎粕で 70.6%, 芋焼酎粕で 63.4%と目標の 60%を超える回収率を達成した。そして、回収したエネルギーをボイラで熱エネルギーに変換することで、年間約 950 トンの二酸化炭素排出量の削減に貢献できた。さらに、ランニングコストは現状の焼酎粕処理費に比べ安価であることから、システムの有効性が立証できた。

**キーワード:** 焼酎粕, 水素発酵, メタン発酵, バイオガス, 二酸化炭素排出量削減

## 1. はじめに

酒類は日本酒、ビール、ワインなどの醸造酒、焼酎、ウィスキー、ウォッカなどの蒸留酒、カシス、梅酒などの混成酒に分類される。醸造酒は原料を発酵させて飲まれる酒で、絞り粕は固形物である場合が多く処理が比較的容易である。一方、蒸留酒は発酵によって生まれた酒をさらに蒸留して作った酒のことで、残渣の含水率が 90%以上であるため、放置しておくとも腐敗しやすく保存性が悪い。蒸留酒である単式蒸留しょうちゅう（いわゆる本格焼酎）は、平成 12 年頃から本格焼酎ブームにより生産量が増加し、酒類全体に占める焼酎の比率は 30%に達している<sup>1)</sup>。

焼酎の生産において、蒸留過程で発生する有機物を含む残渣は焼酎粕と呼ばれ、芋焼酎であれば焼酎製品量の 2 倍強、麦、米焼酎であればほぼ同等量の焼酎粕が発生する。焼酎粕の処分はこれまで海洋投棄、農地還元、飼料が主流であった<sup>2)</sup>。しかし、平成 19 年 4 月に海洋投棄が原則禁止となり、焼酎ブームによる焼酎粕の増加もあり、新たな陸上での処分方法が求められている。その処分方法の一つとしてエネルギーを回収できるメタン発酵処理プラントが注目されている。焼酎工場では蒸留工程などで多くの熱エネルギーが必要であり、焼酎粕からエネルギーを回収して工場内で利用することは省エネルギーにつながり、二酸化炭素の排出量削減に寄与できる。

タクマはこの焼酎粕を原料として水素メタン二段発酵することで可燃性のバイオガスを効率良く回収し、ボイラにて熱エネルギー（蒸気）に変換するシステムを開発し、実用プラントを稼働させている。本報では実用プラントにおけるシステムの詳細、ガス発生特性、システムの導入効果について報告する。

## 2. 水素メタン発酵システムの概要

### 2.1 システムの原理

メタン発酵はさまざまな細菌群の共生的な代謝作用によって、有機物中に含まれる炭水化物、タンパク質、脂質が、加水分解、酸生成、酢酸生成、メタン生成という段階的な反応を経由して、最終的にはメタンと二酸化炭素へと安定化される（Fig.1）。各段階で分解を行う細菌群は異なり、それぞれの最適環境条件も異なるため、発酵槽全体を完全に混合して単一の環境状態にした場合、その環境状態に適していない微生物群はその能力を最大限に発揮できなくなる。そこで、本システムでは分解過程を『可溶化・水素・酸生成段階』、および『メタン生成段階』の二段階に分け、それぞれの段階を最適化することでメタン単独発酵と比べ高効率な発酵を可能にした。

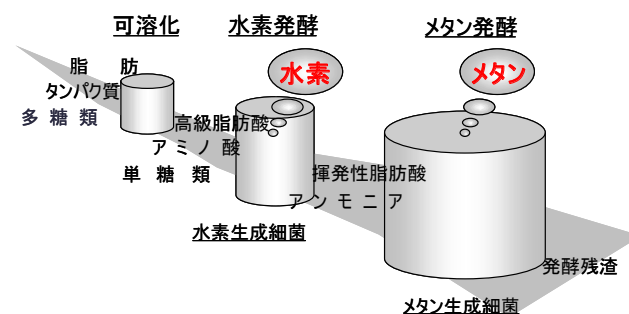


Fig.1: Anaerobic metabolism

### 2.2 プラントの概要

本プラントを設置した焼酎工場は、年間を通して焼酎の製造を行っており、芋が収穫される 8 月中旬から 12 月までは芋焼酎を生産し、それ以外の 1 月中旬から 7 月までは麦焼酎を生産している。原料が切り替わる

前後約 1 ヶ月は製造が停止するため、焼酎粕の発生がない。そのため、プラントは 9 月から 12 月末までの年間約 120 日を芋焼酎粕、2 月から 7 月下旬までの年間約 180 日を麦焼酎粕の処理を行う。プラントの計画処理量は、芋焼酎粕時  $50\text{m}^3/\text{d}$ 、麦焼酎粕時  $33\text{m}^3/\text{d}$  である (photo.1)。

本システムは、水素メタン発酵設備、ガス利用設備、発酵残渣処理設備で構成される (Fig.2)。各設備の概要を次に示す。

#### ①水素メタン発酵設備

焼酎粕は焼酎製造工場内の焼酎粕タンクより 40～90℃で排出される。繊維分などを除去後、前処理槽にて pH 調整および温度調整して、酸素のない嫌気的条件下で中温 (35℃) の水素発酵、メタン発酵の二段発酵を行う。水素発酵では約 1 日かけて発酵を行い、発酵後の基質は酢酸、酪酸などの有機酸へと変換していることから、後段で効率よくメタン発酵することができる。

#### ②ガス利用設備

水素発酵槽、メタン発酵槽から発生したバイオガスは脱硫後、ガス貯留槽に貯留し、その後ガス昇圧ブロワにより蒸気ボイラに供給され、蒸気として熱回収する。蒸気は、焼酎製造工場に供給・利用される。

#### ③発酵残渣処理設備

メタン発酵後の残渣は脱水機を設けて固液分離し、脱水ろ液と脱水ケーキとして回収する。脱水ケーキは有機物及び菌体であることから、その一部を前処理槽へ戻し、系内の細菌群を最適濃度に保ってバイオガスの発生効率を高めるとともに、残渣を再循環することで未発酵の有機物もさらに発酵させて全体のエネルギー回収率を高めている。



photo.1: Demonstration Plant of Hydrogen-Methane Fermentation of Shochu Distillation Lee

### 2.3 原料性状

常圧蒸留後の芋焼酎粕および減圧蒸留後の麦焼酎粕を用いて運転を行った。それぞれの性状を Table 1 に示す。焼酎粕は、一般に製品 (焼酎) の 1～2 倍程度が発生し、その成分には原料由来の繊維や灰分等の固形物の他、発酵過程で生成する有機酸も含まれているため pH4 程度の酸性を示す。

Table 1: Properties of shochu distillation lees

|                       |          | sweet potato |         |         | barley  |         |         |
|-----------------------|----------|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                       |          | average      | maximum | minimum | average | maximum | minimum |
| Total solids          | %        | 6.1          | 7.0     | 5.3     | 10.4    | 14.7    | 8.5     |
| Volatile solids       | %        | 5.5          | 6.3     | 4.8     | 9.8     | 14.1    | 7.9     |
| COD <sub>Cr</sub>     | g/kg     | 82.7         | 101     | 62.7    | 159     | 184     | 139     |
| Total Nitrogen        | mg/kg    | 2,220        | 2,800   | 1,840   | 6,380   | 8,090   | 4,610   |
| Carbohydrate          | mg/kg    | 27,100       | 39,400  | 23,300  | 33,500  | 55,600  | 23,000  |
| Gross calorific value | kJ/kg-TS | 18,200       | 20,300  | 16,000  | 21,500  | 25,400  | 19,000  |

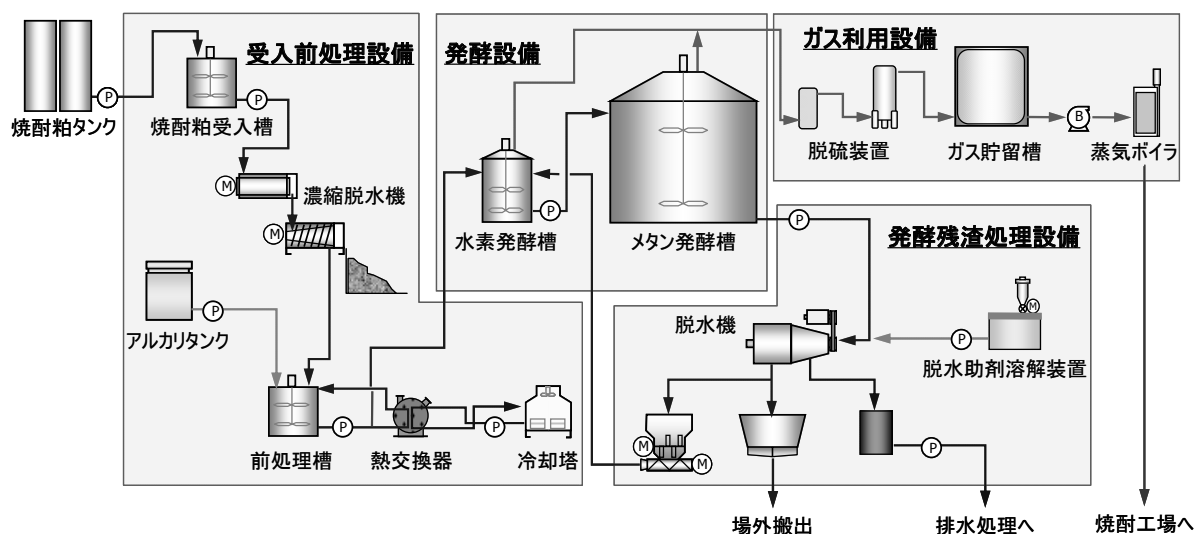


Fig.2: Flow diagram of demonstration plant

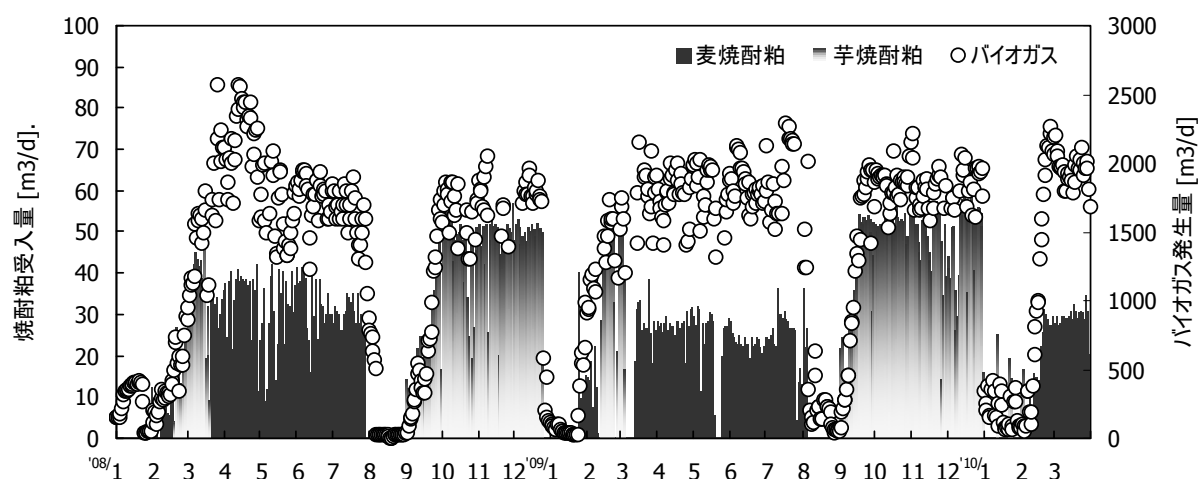


Fig.3: Receipt of shochu distillation lees and biogas production at the operation period

### 3. 運転結果および考察

#### 3.1 プラント性能

運転中の焼酎粕の処理量とバイオガス発生量を Fig.3 に示す。メタン発酵槽の  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  負荷はプラント立ち上げ期間を除くすべての期間を平均すると、芋焼酎粕で  $3.6\text{kg}/\text{m}^3/\text{d}$ 、麦焼酎粕で  $3.9\text{kg}/\text{m}^3/\text{d}$  であった。そのときの焼酎粕  $1\text{m}^3$  あたりのバイオガス発生量は芋焼酎粕で  $32\sim 35\text{m}^3/\text{m}^3$ 、麦焼酎粕では  $53\sim 64\text{m}^3/\text{m}^3$  であった。麦焼酎粕は各年度で固形物濃度が異なっていたため、投入量あたりのバイオガス量に差があった。そこで、それぞれを投入有機物あたりのバイオガス量に換算して評価すると、ほぼ一定の数値となり、芋焼酎粕で  $653\text{m}^3/\text{ton-VS}$  ( $423\text{m}^3/\text{ton-COD}_{\text{Cr}}$ )、麦焼酎粕で  $641\text{m}^3/\text{ton-VS}$  ( $396\text{m}^3/\text{ton-COD}_{\text{Cr}}$ ) であった。

メタン発酵槽内のアンモニア性窒素は芋焼酎粕で  $1,470\text{mg}/\text{L}$ 、麦焼酎粕  $3,310\text{mg}/\text{L}$  であり、中温発酵のアンモニア阻害濃度である  $4,500\text{mg}/\text{L}$  以下<sup>3)</sup>に保たれていた。

#### 3.2 エネルギー回収率

エネルギー回収率は投入原料の保有エネルギーと、システムに投入した電力量に対して、どれだけエネルギー（バイオガス）が回収できたかを示すものとして次の式で定義した。

エネルギー回収率[%]

$$= (\text{発生ガスの熱量 (低位)} [\text{kJ}]) \div$$

$$((\text{原料の持込熱量 (高位)} [\text{kJ}]) + (\text{設備消費電力量} [\text{kJ}]))$$

麦焼酎粕、芋焼酎粕においてエネルギー回収率を計算し、それぞれのエネルギー収支を Fig.4 に示す。芋焼酎粕のエネルギー回収率は 63.4%、麦焼酎粕のエネルギー回収率は 70.6%に達した。

メタン発酵には中温発酵、高温発酵があり、 $55^\circ\text{C}$ を発酵の最適温度域とする高温発酵では回収したエネ

ギーのうち、自己システムを加温するために約 20%を利用するため、実質的に 80%しかエネルギーが利用できない。しかし、本システムでは  $35^\circ\text{C}$ 域の中温発酵を採用しているため芋焼酎粕、麦焼酎粕いずれにおいても回収したエネルギーの全量を有効利用でき、エネルギー効率が低い。

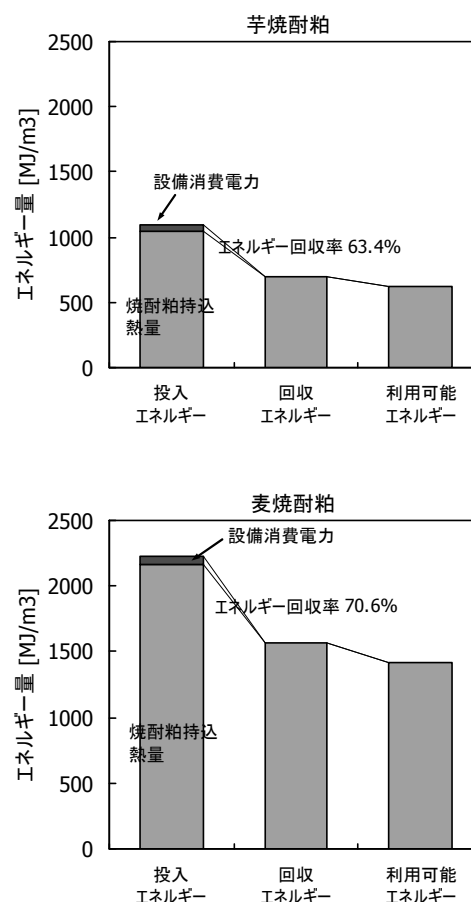


Fig.4: Energy balance

## 4. 経済性の検討

### 4.1 ランニングコスト

芋焼酎粕、麦焼酎粕を処理した際のランニングコスト（電力、上水、薬品）を Table 2 に示す。本システムで芋焼酎粕、麦焼酎粕を処理する 1m<sup>3</sup> 当たりの電力、上水、薬品コストはそれぞれ 1,220 円/m<sup>3</sup>、1,960 円/m<sup>3</sup> である。

一方、本プラントから発生したバイオガスを蒸気に変換し、焼酎工場で利用することで、工場で消費する化石燃料を削減することができる。その A 重油の単価を 60 円/L とすると、重油削減分を含めたランニングコストはそれぞれ -26 円/m<sup>3</sup>、-44 円/m<sup>3</sup> となる。飼料化等他の処理方法での焼酎粕処理単価は 5,000～10,000 円/m<sup>3</sup> であることから本システムが有効であることが分かる。

**Table 2** Running cost of shochu distillation lees treatment

|                   | unit price                  | sweet potato                        |                          | barley                              |                           |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
|                   |                             | consumption                         | cost                     | consumption                         | cost                      |
| Power consumption | 15.25 yen/kWh               | 9.6kWh/m <sup>3</sup>               | 146 yen/m <sup>3</sup>   | 13.4kWh/m <sup>3</sup>              | 204 yen/m <sup>3</sup>    |
| Water             | 127 yen/m <sup>3</sup>      | 0.46 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | 58 yen/m <sup>3</sup>    | 0.96 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> | 122 yen/m <sup>3</sup>    |
| Plant chemicals   | -                           | -                                   | 1,020 yen/m <sup>3</sup> | -                                   | 1,630 yen/m <sup>3</sup>  |
| Subtotal          |                             |                                     | 1,224 yen/m <sup>3</sup> | -                                   | 1,956 yen/m <sup>3</sup>  |
| Steam supply      | ▲5,000yen/ton <sup>-1</sup> | 0.25 ton/m <sup>3</sup>             | ▲1,250yen/m <sup>3</sup> | 0.40 ton/m <sup>3</sup>             | ▲2,000 yen/m <sup>3</sup> |
| Total             |                             |                                     | ▲ 26 yen/m <sup>3</sup>  |                                     | ▲ 44 yen/m <sup>3</sup>   |

### 4.2 二酸化炭素削減効果

焼酎粕等のバイオマスを水素メタン発酵することにより、可燃性ガスであるバイオガスを効率よく回収し、ボイラで熱エネルギー（蒸気）に変換することで、従来焼酎製造工程で使用していた化石燃料の量を削減することができる。芋焼酎粕 1m<sup>3</sup> あたり 62kg、麦焼酎粕 1m<sup>3</sup> あたり 98kg の二酸化炭素排出量を削減ことができ、本プラントでは年間約 950 トンの二酸化炭素排出量を削減しており地球温暖化防止に貢献した。

## 5. まとめ

これまでに得られた知見を以下に示す。

- ・エネルギー回収率は、前処理脱水の最適化を行い、麦焼酎粕で 70.6%、芋焼酎粕で 63.4%を達成した。また、本システムでは加温等にエネルギーを使用する必要がなく、回収したエネルギーの全量を系外で利用できた。
- ・年毎に芋焼酎粕、麦焼酎粕の受入を繰り返しながら、2 年以上にわたって安定した処理を行うことができた。
- ・本システムの焼酎粕処理費は、芋焼酎粕で 1,220 円/m<sup>3</sup>、麦焼酎粕で 1,960 円/m<sup>3</sup> であるが、発生したバイオガスを利用することによる化石燃料削減費を加味すれば、-26 円/m<sup>3</sup>、-44 円/m<sup>3</sup> となる。
- ・芋焼酎粕 1m<sup>3</sup> あたり 62kg、麦焼酎粕 1m<sup>3</sup> あたり 98kg の二酸化炭素排出量を削減することができ、本プラントでは年間に約 950 トンの二酸化炭素排出量を削減し、地球温暖化防止に貢献した。

## 謝辞

本研究は NEDO 技術開発機構「バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業」の一環として行われたものであり、実証試験フィールドを提供していただいた濱田酒造株式会社殿他、多大なご協力をいただきました関係者各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本銀行鹿児島支店（2008 年 2 月 5 日）．"焼酎ブームのその先にあるものは!?～今回の焼酎ブームの特徴～"．かごしまノート．<http://www3.boj.or.jp/kagoshima/data/note/n0802.pdf>，（参照 2009-08-28）．
- 2) 外川健一．海洋投棄問題と手続的正義—南九州地域の焼酎廃液処理問題を題材として—．比較社会文化：九州大学大学院比較社会文化研究科紀要．1997，vol. 3，p. 81-88．
- 3) 野池達也．メタン発酵．技報堂出版，2009，283p．，IXBM978-4-7655-3440-6．