

# 醗酵食品残渣を原料とした乳酸生成システムの環境影響評価

森智和<sup>1</sup>, 上野良平<sup>1</sup>, 斎藤美貴<sup>2</sup>, 長沼孝多<sup>2</sup>, 小嶋匡人<sup>2</sup>, 橋本卓也<sup>2</sup>, 木村英生<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>山梨県環境科学研究所, <sup>2</sup>山梨県工業技術センター)

**要約** 醗酵食品残渣を原料として乳酸を生成するシステムについて環境影響評価を行った。醗酵残渣から乳酸を生成するための様々なプロセスについてプロセスフローを作成し、環境影響となるエネルギーや資源の消費量、薬剤や副資材の投入量、環境影響物質の排出量を調査した。これらのデータから環境影響評価を行ったところ、本乳酸生成システムでは発酵プロセスや培養プロセスなど電力を用いて加熱・保温を行うプロセスで環境負荷が大きくなっていることが示された。類似の乳酸生成システムと環境影響を比較すると、乳酸生成量あたりの環境負荷が大きいため、実用化を検討する際は電力を使用するプロセスの改善やシステムの大型化による効率化などを図る必要があると考えられる。

## Environmental impact assessment of Lactic acid production system from Food Processing Waste

Tomokazu MORI<sup>1</sup>, Ryohei UENO<sup>1</sup>, Miki SAITO<sup>2</sup>, Kota NAGANUMA<sup>2</sup>, Masato KOJIMA<sup>2</sup>, Takuya HASHIMOTO<sup>2</sup>, and Hideo KIMURA<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>Yamanashi Institute of Environmental Sciences, <sup>2</sup>Yamanashi Prefectural Industrial Technology Center)

**Abstract** In this study, we evaluated the environmental impact assessment of Lactic acid production system from Food Processing Waste. We developed process flow for process in lactic acid production system and investigated the consumption of energy and resources, emissions of environmental impact and the amount of materials and chemical substances input. Results of Environmental impact assessment with these data, environmental impact was higher in the heating process such as fermentation processes and culture process in our lactic acid production system. Comparing the environmental impact of similar lactic acid production systems, Environmental impact per unit of lactic acid production is higher in our lactic acid production system. Result of comparing the environmental impact per unit of lactic acid production of similar lactic acid production systems, Environmental impact of our lactic acid production system is higher. Therefore, when considering the practical application it is necessary in order to improve the efficiency of larger systems and using electric power process.

### 1. 緒言

乳酸は近年注目されている生分解性プラスチックであるPLA (Poly Lactic Acid: ポリ乳酸)の原料であり、トウモロコシやイモ、テンサイなどの植物バイオマス中に含まれるでんぷんから得られるため、再生可能なプラスチック原料として期待されている。乳酸を生産するシステムについて、これまで様々な研究が行われており、乳酸醗酵原料や乳酸生産菌の選定、生成乳酸の分離方法など、その検討は多岐にわたっている<sup>1)</sup>。

一方、本県では特産品としてワインが有名であり、その原料であるブドウの搾り滓が毎年多く排出されるため、有効な利活用が求められていた。

これまで我々は、ブドウ搾り滓に、米糠や酒粕、醤油粕などの醗酵食品残渣を加えることで、良好な乳酸醗酵培地となることを明らかにしてきた<sup>2)</sup>。

しかし、醗酵食品残渣から乳酸を生成する手法について、本当に環境に良いのか、どれだけ環境に良いのかということとはわかっていない。

そこで本研究では、山梨県内の醗酵食品業で排出される醗酵食品残渣を原料として乳酸を生成するシステムについて環境影響評価を行い、環境面での有効性や問題点、改善すべき点を定量的に把握することを目的とした。

### 2. 実験方法

本研究で検討したブドウ滓、米糠、醤油粕などの醗酵食品残渣から乳酸を生成するシステムについて環境影響評価を行った。このシステムの各プロセスにおいて投入される原材料、資源やエネルギー、排出される環境影響物質などを把握し、各プロセスの環境影響を算出することでシステム全体について環境影響を評価する。

#### 2-1 発酵残渣からの乳酸生成におけるインベントリデータ収集

評価対象となる本システムのプロセスフローを図1に示す。機能単位はこのシステムを経て1 kgの精製乳酸を生成することとした。米糠は糖化プロセス、ブドウ滓は酵母調製プロセスをそれぞれ経た後、醤油粕と併せて乳酸醗酵培地となり乳酸醗酵プロセスへ投入される。得られた粗乳酸液はろ過プロセス、電気透析プロセスを経て精製乳酸となる。これらのそれぞれのプロセスについて、環境影響算出のための資源・エネルギー消費データや環境影響物質の排出データを収集した。



図1 乳酸生成システムのプロセスフロー

### 2-1-1 糖化プロセス

糖化プロセスでは乳酸発酵プロセスでの糖濃度が10%になるよう米糠と蒸留水、糖化酵素グルクSG(アマノエンザイム社製)を加え、55℃、巡回振とう40 rpmで24時間反応させた。このプロセスではユーティリティとして熱、電力、水を使用し、副資材として酵素を使用した。

### 2-1-2 酵母調製プロセス

酵母調製プロセスではブドウ滓に蒸留水を加えたものを、30℃、通気攪拌で28時間自己消化させた。このプロセスではユーティリティとして電力、水を使用した。

### 2-1-3 乳酸発酵プロセス

乳酸発酵プロセスはジャーフェーマンターを用いた嫌気乳酸発酵を行った。米ぬか発酵培地とブドウ滓酵母に破碎した醤油粕と無機成分である硫酸マグネシウム七水和物と硫酸マンガン(II)五水和物を添加し、温度は37℃、50 rpmで攪拌しながら、28%アンモニア水を用いてpHを6.0に保持し、72時間培養した。このプロセスではユーティリティとして熱、電力、水を使用し、副資材として硫酸マグネシウム七水和物と硫酸マンガン(II)五水和物、アンモニア水を使用した。

### 2-1-4 発酵残渣除去プロセス

発酵残渣除去プロセスでは、実験室レベルでは遠心分離とろ紙によるろ過を用いたが、乳酸1 kgを生成する工業プロセスを想定するとこの方法は現実的ではないため、ろ布による粗ろ過と精密ろ過を用いると想定した。このプロセスではユーティリティとして電力を使用し、副資材として粗ろ過、精密ろ過用のろ布を使用した。

### 2-1-5 電気透析プロセス

電気透析プロセスではバイポーラ電気透析膜を用いた乳酸の分離を行った。発酵乳酸液をバイポーラ膜に供給しつつ3.5時間電気透析を行い、乳酸とアンモニアを分離した。

また、本システムではバイポーラ電気透析プロセスの乳酸分離能を保つため、0.5%硝酸によるバイポーラ電気透析膜の洗浄が必要である。よってこのプロセスでは、乳酸分離時にユーティリティとして水と電力を使用し、副資材として水酸化ナトリウム、バイポーラ電気透析膜を使用する。また、副産生成物としてアンモニアを得る。さらに、膜洗浄時にユーティリティとして水と電力を使用し、副資材として硝酸を使用する。

表1に各プロセスの消費ユーティリティと物質排出量を示す。

## 2-2 システム全体の環境影響評価

### 2-2-1 インベントリ分析

システム内のそれぞれのプロセスについて収集した資源・エネルギー消費データや環境影響物質の排出データを基に、乳酸1 kgを生成する際に必要な投入資源・エネルギーと排出される環境負荷物質を算出した。本研究では実験スケールでこれらのインベントリデータを得たが、乳酸1 kg生成スケールに拡張する際、エネルギー消費に関しては能力の0.6乗則に従うものとして分析を行った。

表1 各プロセスの消費ユーティリティと物質排出量

	インベントリ	使用量	単位	使用ポイント
米糠糖化	水	2.97	L	糖化溶媒
	電力	8.61	kWh	振盪培養
	酵素	0.0013	kg	糖化酵素
酵母培養	水	17.83	L	培養溶媒
	電力	13.89	kWh	保温、攪拌
乳酸発酵	水	1.76	L	糖化溶媒
	電力	21.51	kWh	保温、攪拌、ポンプ
	MgSO <sub>4</sub> 7水和物	0.0014	kg	培地用無機添加物
	MnSO <sub>4</sub> 5水和物	0.0007	kg	培地用無機添加物
	28% NH <sub>3</sub>	1.11	L	pH調整
濾過	電力	1.22	kWh	ポンプ
	残渣処理	3.14	kg	発酵残渣
精製 (電気透析)	純水	39.33	L	分離用水
	電力	3.56	kWh	ポンプ、電気透析
	NaOH	0.39	kg	透析電極液
	水	262.17	L	膜洗浄用
	排水処理	303.56	L	分離用水、洗浄水排水
	硝酸	0.26	kg	膜洗浄用

表2 乳酸生成システムのインベントリ分析結果

	名前	排出・消費量	単位
資源	一般炭	4.80	kg
	天然ガス	2.32	kg
	ケイ砂	1.7E-05	kg
大気圏	CO <sub>2</sub>	22.26	kg
	CH <sub>4</sub>	4.8E-04	kg
	N <sub>2</sub> O	9.9E-04	kg
	NMHC	8.8E-04	kg
	NO <sub>x</sub>	9.4E-03	kg
	NO <sub>x</sub> (移動発生源)	2.6E-03	kg
	PM10(移動発生源)	1.9E-04	kg
	SO <sub>2</sub>	9.9E-04	kg
	ばいじん	2.3E-04	kg
	炭化水素	4.9E-04	kg
水圏	BOD	1.3E-11	kg
	Cd	4.1E-10	kg
	Cr	8.1E-09	kg
	Hg	2.7E-10	kg
廃棄物	低レベル放射性廃棄物	2.9E-04	kg
	産廃・埋立廃棄物	3.9E-03	kg

表3 各プロセスの環境影響領域へのインパクト評価

環境影響領域	地球温暖化	酸性化	化石エネルギー資源消費
特性化モデル	GWP <sub>100</sub>	DAP	MJ
米糠糖化	3.89	2.19E-03	50.63
酵母培養	6.28	3.53E-03	81.70
乳酸発酵	9.82	5.52E-03	131.66
濾過	0.14	8.09E-05	1.87
精製(電気透析)	2.44	1.75E-03	34.18
総計	22.57	0.0131	300.04

表4 各プロセスのインベントリ分析結果

	名 前	単位	全体	米糠糖化	酵母培養	乳酸発酵	濾過	精製(電気透析)
地球温暖化	CO <sub>2</sub>	kg	22.263	3.84E+00	6.194	9.683	0.141703	2.407
	CH <sub>4</sub>	kg	4.80E-04	8.21E-05	1.33E-04	2.05E-04	3.03E-06	5.73E-05
	N <sub>2</sub> O	kg	9.95E-04	1.66E-04	2.68E-04	4.54E-04	6.14E-06	1.00E-04
酸性化	NO <sub>x</sub>	kg	9.36E-03	1.60E-03	2.58E-03	4.06E-03	5.91E-05	1.06E-03
	NO <sub>x</sub> (移動発生源)	kg	2.63E-03	4.52E-04	7.29E-04	1.13E-03	1.67E-05	3.03E-04
	SO <sub>2</sub>	kg	9.85E-04	1.13E-04	1.82E-04	2.80E-04	4.16E-06	4.07E-04
	SO <sub>x</sub>	kg	3.49E-03	6.07E-04	9.80E-04	1.52E-03	2.24E-05	3.67E-04
化石エネルギー資源消費	一般炭	kg	4.805	0.837	1.351	2.091	0.031	0.495
	原油(資源)	kg	1.017	0.155	0.251	0.388	0.005734	0.217
	天然ガス	kg	2.315	0.390	0.629	1.069	0.01438	0.214

## 2-2-2 インパクト評価

インベントリ分析で得られたデータを基に、被害算定型環境影響評価手法LIME(Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling)<sup>3)</sup>に基づいて各環境影響領域への影響評価を行った。評価方法は各環境影響領域のインパクト評価とし、評価する環境影響領域は、地球温暖化・酸性化・エネルギー消費量とした。インベントリデータ作成で算出された環境負荷物質に、各影響領域に及ぼす効果に応じた重みを与えて、環境影響の大きさを集計した。

## 3. 結果および考察

### 3-1 システム全体の環境影響評価

乳酸生成システムのプロセスフローとインベントリデータを基に、システム全体のインベントリ分析を行った。表2にインベントリ分析結果の一部を示す。

さらに、インパクト評価によってそれぞれのプロセスについて各環境影響領域への影響の大きさを評価した。表3にインパクト評価結果を示す。

表中の色が濃くなっている部分がそれぞれの影響領域の中で影響が大きい。ここから、すべての環境影響領域において乳酸発酵プロセスの環境影響が大きく、全体の40%程度を占めていることがわかった。プロセスごとのインベントリ分析結果を見ると(表4)、乳酸発酵プロセスは地球温暖化領域ではCO<sub>2</sub>の排出量が大きく、酸性化領域ではNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>の排出量が、化石エネルギー資源消費領域では一般炭と天然ガスの消費量が大きくなっていることがわかる。これは、電力を得る際に発電所で排出される環境負荷物質と消費される資源が主となっており、表1と表3を見てもほぼ電力の消費量に比例して環境影響が大きくなっていることがわかる。

よって本乳酸生成システムでは、発酵や培養など保温や攪拌に電気を消費することが最も環境に影響を与えているということが示された。

### 3-2 他の乳酸生産方法との比較

本乳酸生成システムの環境影響を客観的に評価するため、他の乳酸生産方法と比較した。

米カーギル・ダウ社がトウモロコシからポリ乳酸を生成するプラントでは、1 kg乳酸生成あたりのCO<sub>2</sub>排出量とエネルギー消費量はそれぞれ3.93 kg-CO<sub>2</sub>、69.3 MJと報告されている<sup>4)</sup>。また、山形大学にて古米を原料とした乳酸生成プラントでは、1 kg乳酸生成あたりのCO<sub>2</sub>排出量とエネルギー消費量はそれぞれ2.98 kg-CO<sub>2</sub>、14.78 MJと報告されている<sup>5)</sup>。

本乳酸生成システムではCO<sub>2</sub>排出量とエネルギー消費量はそれぞれ22.57 kg-CO<sub>2</sub>、300.04 MJであり、他のシステムと比較すると環境影響は一桁大きくなってしまっている。これは、乳酸生成システムの生産スケールによるものが大きいと考えられる。カーギル・ダウ社はポリ乳酸年産14万トンの巨大なプラント<sup>4)</sup>であり、山形大学は1バッチ100 kg程度のプラント<sup>5)</sup>である。対して本乳酸生成システムは1バッチ1.5 Lの実験室レベルであり、スケールメリットを考慮して評価したとはいえシステムとしての効率が悪いと言わざるを得ない。

## 4. 結 言

醗酵残渣から乳酸を生成するシステムについて環境影響評価を行い、定量的な環境影響を把握することができた。また、他の手法による乳酸生成システムとの環境影響比較を行った結果、本システムの環境影響が必ずしも低くなるわけではないということが示された。

これから本乳酸生成システムを実用化してゆくためには、原料となる醗酵残渣の発生量からプラントの規模を想定し、より実際のプラントに近いスケールでの実証実験を行うことで、環境負荷物質の排出と消費エネルギーを抑えるようにプロセスを改善していくことが必要だと考えられる。

## 参考文献

- 1) 常盤豊: バイオプロセスと生分解性プラスチック, 環境バイオテクノロジー学会誌, Vol.4, No.1, P.5-17 (2004)
- 2) 斎藤美貴, 橋本卓也, 小嶋匡人, 長沼孝多, 木村英生, 吾郷健一, 森智和: 醗酵食品残渣の成分分析とブドウ搾り滓による酵母の培養, 山梨県総合理工学研究機構 研究報告書, Vol.5, P.97-102 (2010)
- 3) 伊坪徳宏, 稲葉敦: ライフサイクル環境影響評価手法

LIME:LCA, 環境会計, 環境効率のための評価手法・  
データベース, (社)産業環境管理協会 (2005)

- 4) Erwin T.H. Vink, Karl R. Ra'bago, David A. Glassner,  
Patrick R. Gruber.: "Applications of life cycle assessment to  
NatureWorks polylactide (PLA) production." Polymer.  
Degradation and Stability, Vol.80, No.3, P.403-419. (1999)
- 5) 森智和, 吾郷健一, 高橋 幸司: 化学工学会75年会要旨  
集, P290 (2010)