

乳酸発酵による食品廃棄物からの乳酸回収と飼料化のコンバインドシステム

国立環境研究所 井上雄三

1. はじめに

わが国は、近代化に向けた先人たちの弛まない努力によって明治以降 100 年、戦後 30 年で先進国の仲間入りを果たした。しかし、わが国は原料資源やエネルギー資源の乏しい国である。外国から大量の化石燃料と資源を輸入し、加工製品を生産・輸出するという科学技術立国を構築した。同時に急速な工業化は生活環境や自然環境に対して多くの犠牲を強いた。また、戦後の急速な経済発展に伴う生活レベルの向上は、高品質・大量生産技術により達成されたが、他方で大量消費や大量廃棄による廃棄物の過剰排出によって廃棄物処理過程や生活環境、あるいは自然環境に多大な負荷をかける結果になった。わが国も 1992 年の地球サミットの議定書に基づき、持続可能な発展のための循環型社会構築に向けた施策が展開されている。しかし、工業製品の大量輸出の代償として安価な農業製品の大量輸入がわが国の農業産業を疲弊化させ、食糧資源自給率の極めて低い¹⁾状況に至っている。

現在展開されている飼料自給率アップ政策（平成 15 年度 24%→平成 27 年度 35%）と関連して食品廃棄物のリサイクルが推進されてきた。同法は施行後 5 年を経過して一定の成果を得ることができたが、多くの課題が指摘され、本年度の見直し検討がされている。本報告では植物由来プラスチックに関しては他の講演者に譲り、私たちがこれまで進めてきた乳酸発酵と飼料化のコンバインドシステムに関して研究成果を紹介し、植物由来プラスチック市場を支えるサブシステムを提案する。

2. 食り法の新展開

周知のように循環型社会形成に向けた施策は、3R の原則に則って進められ、食品廃棄物も例外ではない。発生抑制を促進しながら、リユース・リサイクルの促進が進められる。その中で、食り法では飼料化が第 1 優先（人・家畜への健康を配慮）であり、肥料化は地域需給見込みを把握すべきとされ、メタン化は地域性を左右されない受け皿として重要な要素技術であるが、残渣の適切な処理に留意すべきとされている。一方、油脂・油脂製品化は、有効利用が図られているが、近年バイオディーゼル等新たな市場が急展開しているが、本稿では取り扱わない。

再生利用等の実施目標として、18 年度までに 20%、H19 年度以降については、これまで業種横断一律目標であったが、食品流通の上・下流で実績に大きな差が生じた。すなわち食品工場等から排出される比較的品质が一定の食品廃棄物に関してはリサイクルが目標を上回る成果が出ているが、小売やレストランでは成果にばらつきがでている。今後目標設定のあり方を再検討すべきとしている。また、再生利用等の促進に係る環境整備、適正な再生利用等の取組の確保（不適正な再生利用事業者の登録の排除、大量発生事業者等一定の要件該当者に対する取組など）および飼料自給率の向上、バイオマスニッポン（万円/ton）など関連施策との連携も大いに必要となっている。

3. 飼料市場の変化とエコフィード

米政府はガソリンに対する依存を軽減するために、2017 年までにエタノール義務消費量を約 5 倍に拡大させることを提案した（E20 政策）。米国のこの政策が純粋に対化石燃料成果策か、あるいはだぶついている穀物市場対策か、予断を許さないが、これを受けて米国内のエタノール製造量は 2006 年の 50 億ガロンから、年間

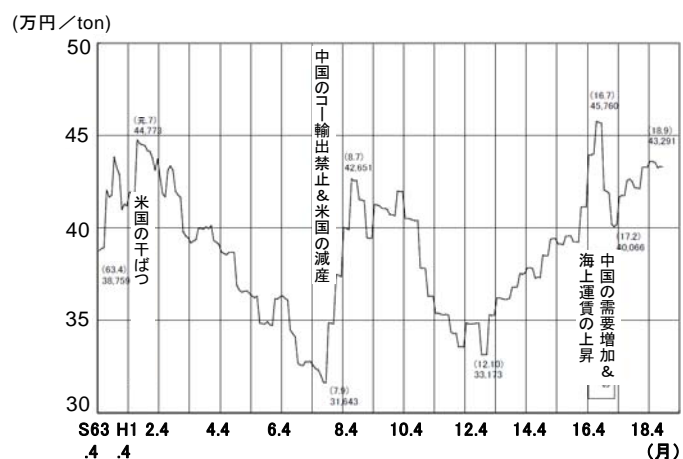


図1 工場渡し配合飼料価格の推移

33%の拡大を記録している。そのため穀物市場価格に大きく影響し、この1年でコーン市場価格は100%近く急騰している。この急騰には中国のBE政策も拍車をかけているとのことである。コーン価格の上昇によってエタノール精製業者の利益率が圧迫されるという皮肉な事態も起こりかねない状況である。英国エコノミスト社によるとコーン価格が4.50ドル/ブッシェルを達成した時点で、エタノール精製事業はコスト割れになり、5ドル/ブッシェル時点で製造中止に追い込まれるとのことである。

しかし、ここではもう一つの問題に焦点を当てる。図1は工場渡し配合飼料価格の推移を示したものである。配合飼料の価格は気候変動や大国の施策によって著しく変動するので、一定のフィードバックがかかるものと思われる。しかし、一方で食料資源がエネルギー資源と競合するという不安定システムが構築されたことは、わが国の食料や飼料の6割が海外に依存していることを考えると大きな不安材料となり、先に述べた飼料自給率の向上施策が重要となることは明らかである。このような状況の中で、養豚事業者は自衛策として食品廃棄物の大量排出者との間で様々なエコフィードの対策を取ってきている。本報告はエコフィードとポリ乳酸生産とをコンバインドし、新たなリサイクルシステムを提案するものである。

4. 食品廃棄物のゼロエミッション型資源回収プロセスの開発

本研究では、年間約940万トンも排出されている食品工場及び事業系からの食品廃棄物を対象として、食品本来が持っている食料としての属性を利用し、家畜や養殖魚の飼料としてカスケード利用するための技術開発を目指している。特に飼料の安全性やワーカビリティを向上するために食品廃棄物のL型ホモ乳酸発酵を行い、飼料化物の抗腐敗性や優先培養乳酸菌の飼養家畜へのプロバイオティック機能を評価し、さらに乾燥・半乾燥飼料による市場の拡大と低コスト化を図るために固液分離発酵残渣液の再利用発酵実験および廃卵殻や蠣殻利用によるpH調整を行い、これらの新しい発酵技術の評価する。飼養対象として養鶏を選定し、乾燥・半乾燥飼料の品質評価と鶏への飼養実験による鶏卵や鶏体および免疫生理評価を行った。回収乳酸は、農業資材として有効利用するために生分解性バイオプラスチックの製品開発を目指すことによって、食品廃棄物のゼロエミッション型資源化技術システムを構築した。以下の研究成果を報告する。

(1) 乳酸発酵プロセス

図2に食品廃棄物の乳酸発酵プロセスを示す。また、用いた乳酸菌 *Lactobacillus manihotivorans* strain

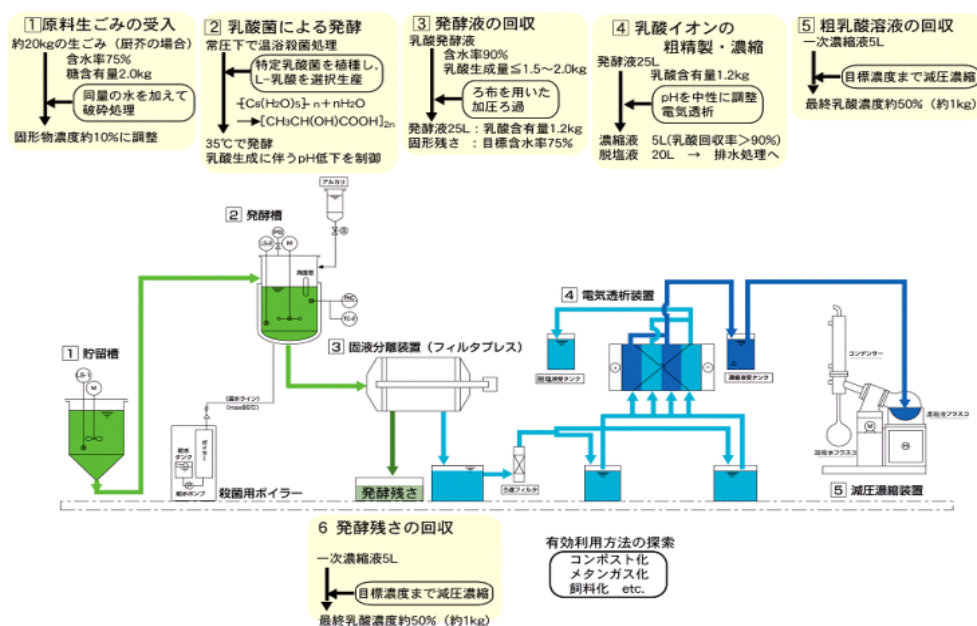


図2 乳酸発酵プロセスの概要

LMG18011 の細菌学的な特徴を図3に、基本的な培養特性を図4に示す。

Lactobacillus manihotivorans strain LMG18011

Membrane-based analysis of S-S-Lbma-0207-a-A-20 probe specificity with RNA from reference strains and strains isolated from sour cassava starch fermentation *a*

species	strain	probe univ./lbma	
<i>Lactobacillus hilgardii</i>	Ond21*	+	-
<i>Lactobacillus manihotivorans</i>	LMG18010*	+	+
<i>Lactobacillus manihotivorans</i>	LMG18011*	+	+
<i>Lactobacillus manihotivorans</i>	Olb7*	+	+
<i>Lactobacillus manihotivorans</i>	Ond29*	+	+
<i>Lactobacillus manihotivorans</i>	Ond30*	+	+
<i>Lactobacillus manihotivorans</i>	Ond31*	+	+
<i>Lactobacillus manihotivorans</i>	Ond33*	+	+
<i>Lactobacillus manihotivorans</i>	YAMI2*	+	+
<i>Lactobacillus paracasei</i>	ATCC 25302	+	-
<i>Lactobacillus plantarum</i>	DSM20174	+	-
<i>Lactobacillus plantarum</i>	LMG18053	+	-

a Univ, probe S*-Univ-1390-a-A-18; Lbma, probe S-S-Lbma-0207-a-A-20; 1, hybridization signal; 2, no signal; *, strains isolated from sour cassava fermentation.

Dendrogram derived from SDS-PAGE protein pattern analysis.

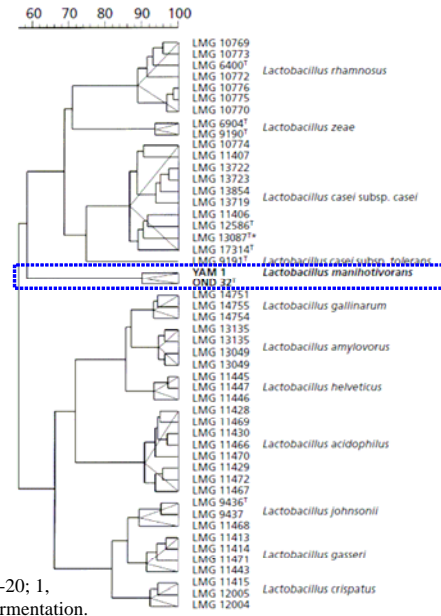


図3 発酵プロセスに用いた乳酸菌

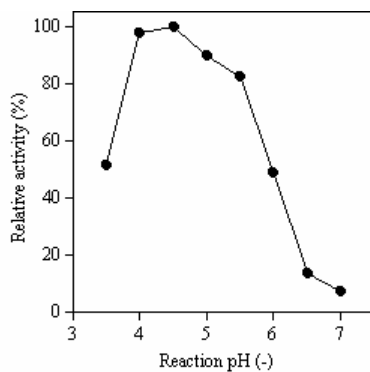
Lactobacillus manihotivorans strain LMG18011

Bacterial physiology:

A homofermentor and only L(+)-lactic acid production

LMG18010 : extracellular amylase activity

LMG18011 : cell-linked amylase activity



Parameters of starch fermentation with pH control by *L. Manihotivorans* LMG18011

	Incubation time (h)	pH		
		4.5	5.0	5.5
μ_{max} (h ⁻¹)	108	0.08	0.125	0.139
Final concentration of lactic acid (g/L)	108	31.3	38.3	28.28
Product yield YL/S (g/g)	53	0.846	0.828	0.611
Optical purity (%)	108	99.5	99.2	92
Accumulation of acetic acid (g/L)	108	3.64	1.61	5.2

Effect of reaction pH on amylase activity

図4 *Lb. manihotivorans* strain LMG18011 の培養特性

(2) ゼロエミッション技術の提案

①廃卵殻による pH 制御：適正な光学純度や製品収率を担保できる乳酸発酵を行うために廃卵殻による pH5.0 一定制御技術を検討する。再利用が問題となっている廃卵殻の再利用はアルカリ消費と廃棄物の再利用と二重のメリットを享受可能となるが、乳酸を精製する段階での、カルシウム分離性能を検討する。

②発酵脱塩液の再利用による発酵効率への影響：基質としての食品廃棄物は、投入時に槽内固形物濃度を制御するために容積比で0.5～1程度の水を添加する必要がある。そのため排水量が多くなり、システムのフィジビリティに打撃を与えかねない。本研究では電気透析によるL乳酸塩分離脱塩水を再利用し、発酵への影響が少ないことを明らかにする。

(3) 発酵・乳酸生成・飼料化実験の条件

- ・ 発酵 48時間 6回連続の回分発酵／培養温度 30℃
 - ・ 工程 (約4日)
 - 培養 — 脱水 — カルシウム除去—電気透析—減圧濃縮
 - (48時間) (4～5時間) (12時間) (8時間) (5時間)
 - 残渣の風乾(2日) — 強制乾燥(40℃)
- pH制御： 粉末炭酸Caを一定培養発酵時間後に投入

表1に発酵原料(食品廃棄物)の組成を示す。

表1 発酵原料(食品廃棄物)の組成

		湿ベース		含水率	固形物量 kg dry	サンプル量 kg	投入基質の 固形物量 (kg dry)
動物性	混合物	0.99	kg	57.0	0.43		
植物性		11.06	kg	72.0	3.10		
混合物小計		12.05	kg	70.8	3.52	10.62	3.10
ごはん		7.22	kg	60.0	2.89	3.75	1.5
トータル		19.28	kg		6.41		4.60

(液量：42L, 2回目以降は20.4Lの脱塩液で希釈)

(4) 結果と考察

1) 発酵プロセス性能

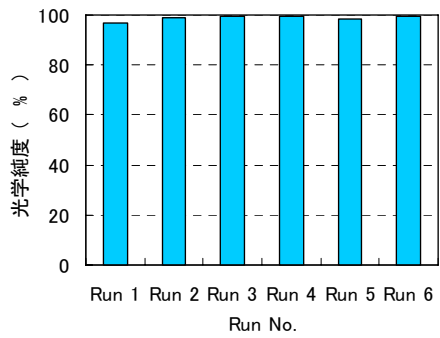
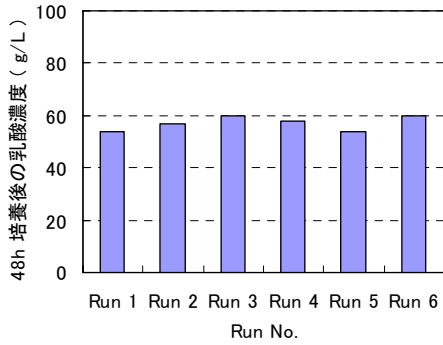
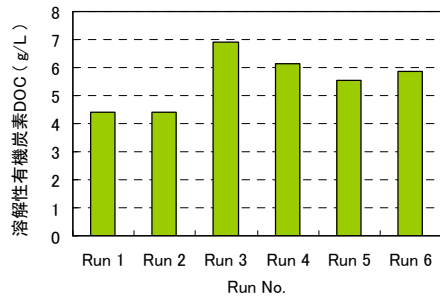
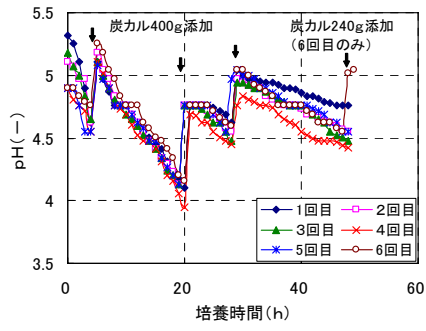
図5に6回の連続回分発酵実験結果を示す。

粉末炭酸カルシウムによるpH制御は、装置の関係上連続フィードができなかったが、pH4～5程度の範囲であれば、発酵性能に殆ど影響がないことがわかり、蠣殻や廃卵殻などを粉末にした廃棄物のリサイクルが可能なことを示すことができた。また、電気透析脱離液(廃液)を希釈液として6回にわたって繰り返し利用したときの乳酸発酵への影響についても、ほとんどないことが明らかになった。評価対象としたファクターは、脱塩液の有機物濃縮度(図6(2))、乳酸濃度(図6(3))、そして光学純度(図6(4))である。

以上より、2日の発酵時間で固形物濃度約10%の食品廃棄物を発酵し、約5%の光学純度99%以上のL-乳酸を生産可能なプロセスをベンチスケールで明らかにした。

2) 工程ごとの液の収支

次に工程ごとの液収支を図6示し、本コンバインドシステムの特性を明らかにする。本コンバインドシステムではフィルタープレスの脱水性能が悪く、結果的には希釈水の全量を脱塩液から得ることができなかったが、約2/3の希釈水の確保で6回の繰り返し実験結果から、排水を全く排出することなく運転可能なことを実証した。



(3) 48時間培養後の乳酸濃度

(4) 48時間培養後の生成乳酸の光学純度

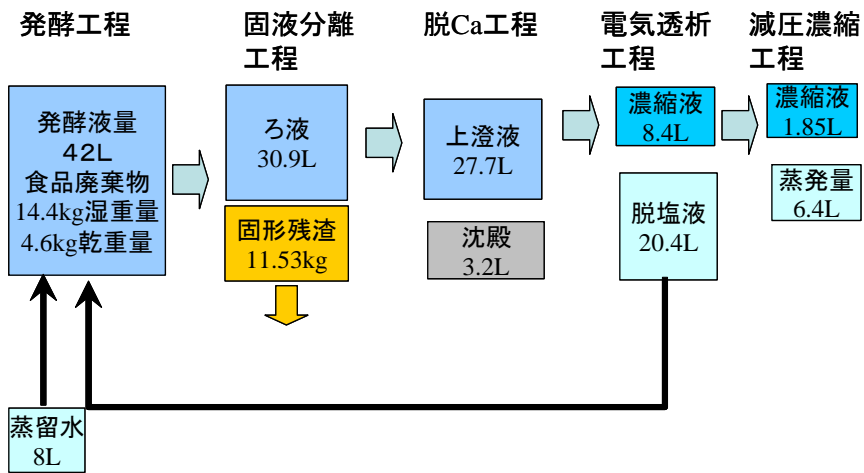


図6 乳酸回収・飼料化コンバインドプロセスの液収支

3) ゼロエミッションシステムの物質収支

以上の実験結果に排出される固形発酵残渣を含めた物質収支を明らかにした（図7）。

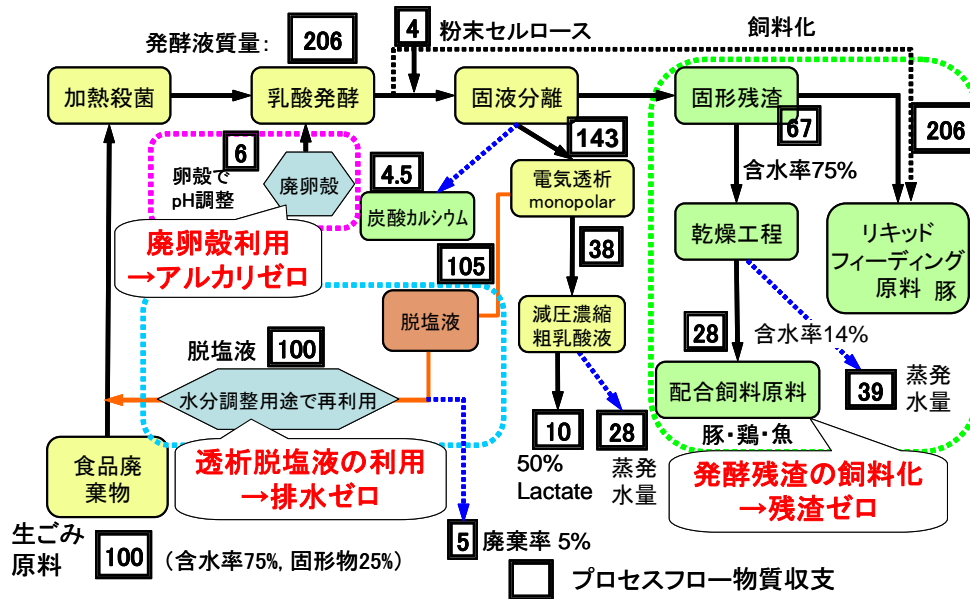


図7 食品廃棄物の乳酸回収・飼料化コンバインドシステムの物質収支

5. エコフィード特性

1) 飼料として品質

発酵残渣飼料の飼料としての品質を表2、図8に示す。豚の飼料と鶏の飼料ではその品質に違いがあるが、今回の飼養実験では豚には10%、鶏には10、20%を添加したので、特別な品質調整は行わなかった。乳酸菌では食品廃棄物中の糖質とペプチドタンパクを基質として利用して、乳酸を生産し、増殖するので、発酵残渣飼料の品質は、デンプンや可溶性糖などの糖質が減少し、結果的にはタンパクや脂質が増加するが、脂質は粉末炭酸カルシウムを添加する際に浮上分離が起こり、発酵液の移送の際に分離され、低下する傾向が見られた（図8）。以上のように糖質が少なく、タンパク質が多い飼料組成となるので、栄養価的には品質が高いとは言えないが、むしろ乳酸菌によるプロバイオティックな効果が期待される飼料と見なすことができる。

表2 発酵残渣の飼料組成

	水分 (%)	CP	EE	CF	Ash	NFE	GE (Mcal/kg)
乳酸発酵残さ	9.91	17.77	5.65	20.09	9.68	36.90	4.437
基礎飼料	12.38	19.63	3.67	3.03	5.64	55.65	4.141

乳酸発酵残さ飼料はCFが高すぎる。CFは10%程度までが望ましい。

CFが高いので盲腸内発酵が盛んに。VFA 産生微増、アンモニア生成増加の原因？

セルロースの添加量を減らすか、逆にケイ藻土などの無機質のものの方に可能性がある？

オートクレーブ処理がタンパク質の消化性を落としている可能性。

CP:粗たんぱく, EE: 粗脂肪, CF: 粗繊維, NFE: 可溶性無窒素物, GE: 総合エネルギー, Ash: 灰分

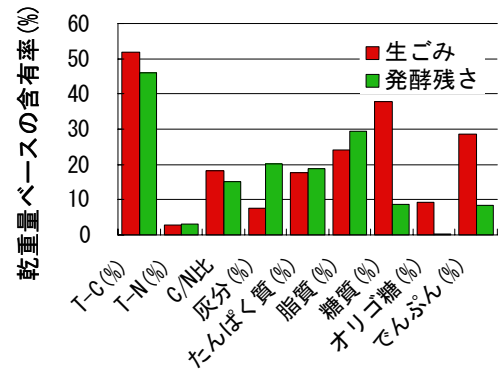
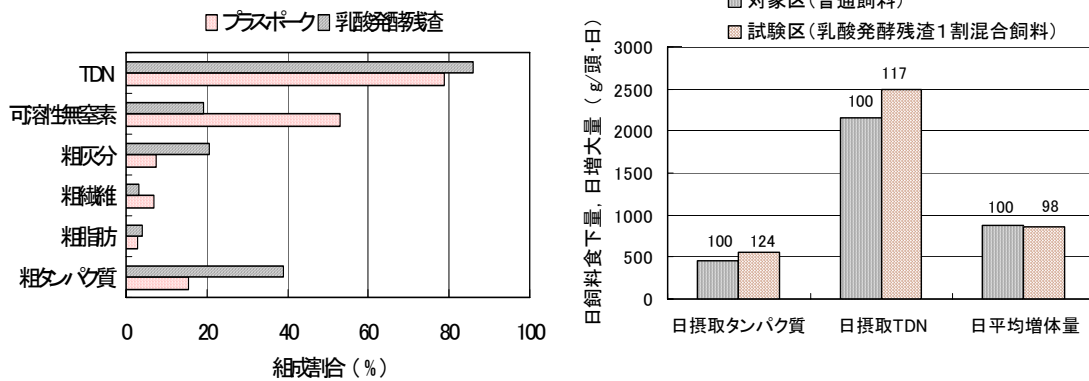


図8 固形発酵残渣の組成

2) 豚への飼養実験結果

豚への飼養実験は、広島県東広島市西条農業高等学校で行われた。実験に協力をしてくれたのは同校高校生でした。プラスポーク配合飼料への配合比 1/9 として、実験期間平成 17 年 2 月 7 日～21 日の 4 週間でいった。結果を図 9 に示すように、本飼料による特段の効果は見られず、むしろ増体量は 98 と若干の低下を示した。なお、本実験では実験に供した豚はその後標準配合飼料を用いて肥育されたので、肉質等の実験は行われなかった。



3) 鶏への飼養実験結果

ヒナへの飼養実験は次のようにして行われた。

材料および方法

- (1) 供試鶏 : ロードアイランドレッド
- (2) 試験鶏舎 : 立体育すう器
- (3) 試験期間 : 1 日齢～28 日齢
(4 週間、平成 18 年 1 月 15 日～12 月 12 日)
(サンプリング : 12 月 13 日)

飼養実験は、標準配合飼料を対象として 60 羽ずつ 3 つの試験区に分けて行いった。添加量は 0, 10, 20% とした。評価項目は、育成率、飼料摂取量、飼料要求率、体重、各種臓器重量 (肝臓、脾臓)、もも肉重量、もも肉 pH、もも肉各種機能物質、盲腸内容物 (pH、細菌数、VFA 濃度)、排出糞量、糞中水分含量である。

結果を以下に示す。

育成率 (%) は、標準配合飼料は、98.3, 10% 添加試験区は 96.7, 20% 添加試験区は 98.3 となり、優位な差は見られなかった。しかし、飼料摂取量は、10% 区については 2 週間目から 3 週間目、20% 区については 1 週間目から 3 週間目にかけて、対照区より少ない値で推移し、4 週間目の平均でみると、10% 区および 20% 区とも対照区に比べて有意に少ない値となった。これは、今回使用した乳酸発酵残さ飼料中の粗繊維が高かったため、消化管内での滞留時間が長くなり、その結果摂取量が低下してしまったのではないかと考えられる。

したがって、発育体重にも同じ傾向が現れた。すなわち、乳酸発酵残さ飼料を配合にすることによって低下する傾向がみられた。10% 区は 129 日齢では対照区に比べて 18g 軽かった。20% 区は 29 日齢では対照区に比べて 40g 軽かった。1 日齢から 29 日齢までの増体重は、対照区が 252g、10% 区が 234g、20% 区が 211g であり、10% 区と対照区の間には有意差は認められなかったが、20% 区は対照区に比べて有意に軽かった。

一方、鶏肉の旨味成分である遊離グルタミン酸量を測定したところ、20% 給与区で有意 ($P < 0.1$) に増加傾向を示した。また、抗酸化ペプチドであるカルノシンおよびアンセリンのモモ肉における含量は、10% 区および 20% 区の

いずれも対照区よりも有意($p < 0.05$)に増加していることが示された。一方、モモ肉中のコレステロール含量は対照区よりも20%区で減少傾向($p < 0.1$)にあることが示された。

また、免疫系ネットワークへの影響を見る目的で、Th1系サイトカイン遺伝子発現としてIFN- γ 、Th2系サイトカイン遺伝子発現をみる目的でIL-4、IL-13のそれぞれの遺伝子発現を脾臓から抽出したRNAを用いてリアルタイムRT-PCRでの測定を試みた。その結果、有意ではないがTh1系サイトカインのIFN- γ は若干上昇するような傾向が見られた。再現性が確認されれば、乳酸発酵残さ飼料には細胞性免疫増強効果がある可能性がある。以上のように付加価値の高い鶏肉の生産の可能性が示された。

なお、もう一つの指標となる環境負荷量に関しては、評価項目として鶏糞の量、含水率、アンモニア濃度などを調査した。その結果、これらの指標に関しては10、20%添加試験区がむしろ悪化傾向が見られた。全体的にいえることは、今回の発酵飼料製造では固液分離のろ過助剤として粉末セルロースを使ったことに原因があることが明らかになった。

4) 考察

豚および鶏への飼養実験の結果、旨み成分の増加やコレステロール値の低下、および抗酸化ペプチドのカルノシンやアンセリンの含量が対象区に比べて有意に増加しており、付加価値の高い鶏肉の生産の可能性が示された。今回製造した固形発酵残渣飼料は、ろ過助剤として粉末セルロースを用いたために、飼料としての品質を低下させたことが判明した。今後の対策として飼料に添加されている珪藻土をろ過助剤として利用することが考えられる。

6. おわりに

1. 発酵液の再利用による無排水、発酵残渣の飼料化、およびバイオプラスチック原料となるL-乳酸の回収を可能とする、食品廃棄物のゼロエミッション型乳酸発酵システム“コンバインドシステム”を構築した。
2. 10,20%混合飼料は、ヒナ増体量が減少し、飼料の改善が必要であるが、鶏肉のpHおよび水分量にはほぼ影響ない。また、鶏肉の旨み成分と機能性ペプチドの著しい増加並びにコレステロールの低下付加価値の高い鶏肉生産の可能性が示された。一方、乳酸発酵残さ飼料は粗繊維が高すぎ、VFA産生微増、アンモニア生成増加の原因となり、セルロースの添加量を減らすか、逆にケイ藻土などの無機質への転換が必要である。

参考文献

1) 農水省統計局 食料需給率累年統計 総合自給率の推移、

<http://www.tdb.maff.go.jp/toukei/a02stoukeiexl?Fname=H001C-017-002-000-000-G.xls&PAGE=2&TokID=H001&TokKbn=C&TokID1=H001C-017&TokID2=H001C-017-002G> (2006)