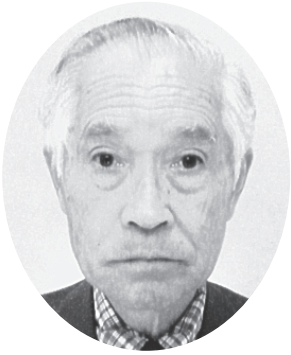
業界の動向

# 未利用資源の有効活用



食品産業関連技術懇話会　会員
技術士（生物工学部門）、農学博士　酒井重男

## はじめに

様々な廃棄物の中でも有機性廃棄物は食品加工工場などから排出される濃厚廃液､加工残渣、ちゅうかいなどの生ごみ、排水処理による余剰汚泥など、処理が非常に難しいものが多い。しかし、未利用エネルギー、未利用資源を豊富に含み、これら再資源化、再利用できれば循環型社会の実現に向けて大きな前進となる。家庭から排出されるちゅうかいなどの生ごみは、紙ごみやプラスチックなどと混合されるため有効利用が極めて困難である。一方、工場から排出される有機性廃棄物については、投入される原料などが把握されるため、品質管理が比較的容易で、また排出量の推定も容易である。そこで、生ごみ、食品加工廃棄物、廃液、バイオマスなどの有効利用を焦点に、現在開発中のもの、或いは新しく開発された製品について述べる。

## 1．固形有機性廃棄物のメタン発酵

バイオマスに含まれる炭素は、大気中に存在した$CO_2$を植物が光合成で固定化したものであり、再生可能なバイオマスを化石燃料の代わりにエネルギー源として利用することで新たな$CO_2$の排出抑制が期待できる。このことから、従来は焼却や埋め立て、コンポストなどで処理されてきた固形有機性廃棄物（固形物10%以上）をバイオマスとして捉えて、メタン発酵によりエネルギーとして利用することが現在注目されている。

一方、ヨーロッパを中心として固形有機性廃棄物のメタン発酵が商業規模で盛んに行なわれており､そのシステムも発酵槽の数（単槽/槽）、水分含量（湿式：80%以上・乾式：80%以下）、温度（中温：37℃ /高温：55℃）などの組み合わせで様々な方式が存在している。2000年の報告では都市ゴミを年間3,000トン以上処理する施設において、発酵槽の数は構造が単純な単槽がメタン発酵槽総容量の90%を占めていた。また水分含量は1990年には大半が湿式であったが1998年には乾式が発酵槽総容量の60%を占めるまで増加した。さらに発酵温度は1990年以前は中温のみであったが1998年に乾式で高温が採用されて以来増加し、2000年には高温が発酵槽総容量の40%を占めていた。実際にどのシステムを選択するかは、廃棄物の種類、排出量、残渣の利用法など地域特性による要因が大きいと考えられる。

日本においても、ヨーロッパの技術を導入して固形有機性廃棄物のメタン発酵を試みているが、商業規模のプラントは未だ実施例が少ない。また2003年にRPS（新エネルギーなどの電気利用法）が実施されてバイオマスなどの新エネルギーを電力源として利用することが義務付けられたが、2010年の達成目標が年間122億

KWh（電力販売量の1.35%）であり、ヨーロッパの目標である22%には遠く及ばない。

ここで、ヨーロッパでも特にバイオガスによるエネルギー生産が盛んなドイツの例を見ると、バイオガスを含む再生可能エネルギーの促進のために、①電力価額政策②再生可能エネルギー電力施設に対する初期投資補助や低利融資、③研究開発補助、と云う政策を実施している。そのうち最も効果が高いのは電力価額政策であり、2000年に施行された再生可能エネルギー法により大幅にバイオガスのプラント数が増加した。この法律で電力の固定価格買い取り制度が導入され、以前よりも高い価格で電力が売られるようになり、さらに、設備稼働から20年間は買い取りが保障された。また電力会社の買い取り上限も撤廃され、その購入負担はドイツ国内の電力会社間で標準化されて最終的には消費者が負担する仕組みになっている[1)]。

## ２．リンゴ搾汁残渣から機能性成分の抽出

青森県は日本一のリンゴ生産量を誇り、平成18年度の統計によれば約44万トンに昇り、全国の生産量の53%に当たる。生産されたリンゴは大部分が生食用に資されるが、一部はリンゴジュース用に搾汁され、その際に排出される搾汁残渣の排出量は１万４千トンに及ぶ。このリンゴジュースの搾汁残渣を産業廃棄物でなく未利用資源として捉え、その産業的価値を見出すことが出来れば、リンゴ産業全体の高付加価値化並びに産業廃棄物削減に繋がる。

リンゴは古くから「１日１個食べれば医者要らず」と云われるように健康や美容に良い食品として認知され、年齢・性別を問わず広く愛されている。リンゴの有効成分としてペクチン、ビタミンC、ポリフェノール、カリウムなどが知られている。ペクチンは植物細胞壁由来の水溶性の植物繊維であり、図１に示すように、ガラクツロン酸がα-1,4結合したポリガラクツロン酸がα-1,4結合したポリガラクツロン酸が主成分である。増粘安定剤やゲル化剤などとして食品製造に幅広く活用されている。またペクチンの作用として、整腸、コレステロール低下、糖尿病予防、アレルギー抑制などの効果が報告されている。またリンゴ搾汁残渣から抽出されるペクチンは、エタノール処理によって得られる繊維成分から分離することによって得られ、その割合は全繊維成分の約29%に当たる。

セラミドはリンゴの有効成分としてあまり知られていないが、リンゴ搾汁残渣がセラミドを多量に含有していることが明らかになった。リンゴは美容に良い果物と云うイメージが強く、リンゴから抽出したセラミドは印象が良いため、リンゴ搾汁残渣から多量のセラミドを抽出し商品化出来れば、市場のニーズに適合した有

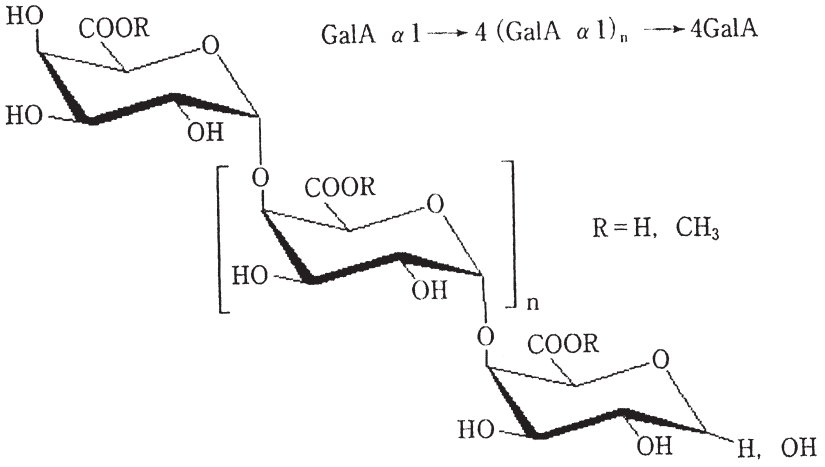



**図１　ガラクツロン酸がα-1,4-結合したペクチンの構造**

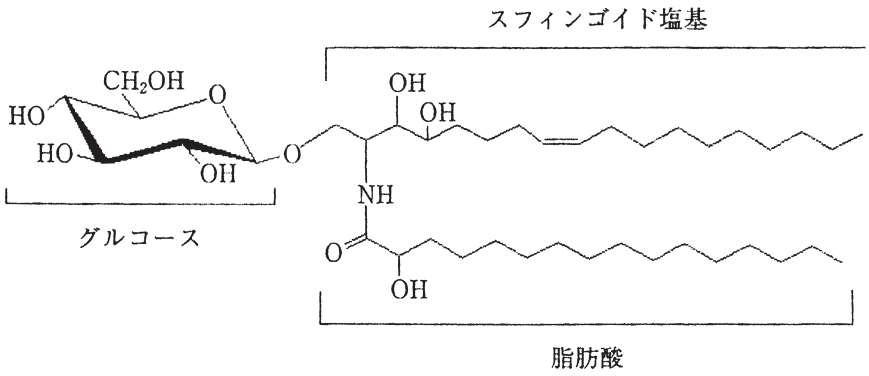



**図２　リンゴに含まれるセラミドの構造**

用な素材となることが予想される。セラミドは人間の角質層の細胞と細胞の間にある細胞間脂質で、肌のバリアの働きをしている。肌の保護効果や美容効果があることが知られており、近年では皮膚への塗布、経口投与の両方法において皮膚保護効果も確認されている。また免疫力向上、アトピー性皮膚炎緩和、大腸がん予防などの効果も報告されてきており、今後もその有効性に関するエビデンスは充実していくものと考えられる。「セラミド」とは本来、スフィンゴイド塩基と脂肪酸が結合したスフィンゴ脂質を指すが、植物から得られえる天然セラミドは、図２に示すように、スフィンゴ脂質にグルコースが結合したグルコシルセラミドのようなスフィンゴ糖脂質として抽出される場合が多い。リンゴに含有されるスフィンゴ糖質としては、4-ヒドロキシ-シス-8-スフィンゲニンがスフィンゴイド塩基部で、それに脂肪酸として2-ヒドロキシパルミチン酸、糖としてグルコースが結合したものが確認されている[2)]。

### ３．でん粉粕の有効利用

でん粉製造は鹿児島県内で毎年約５万～６万ｔ生産され、それに対してでん粉粕がほぼ同量の５万ｔ（水分約80%）発生している。さつまいもには食物繊維が多く、さつまいもからでん粉を抽出した残渣であるでん粉粕は、この良質な食物繊維が濃縮されていると考えられる。従って、でん粉粕から出発した食物素材は、含まれる食物繊維の作用で腸内細菌叢を整え便通を促すことで健康に役立つと期待される。

（１）Bacillus sp.M4酵素分解物のラット試験

Wister系雄ラットを用い食物繊維の機能について評価した。５週齢のラットを３日予備飼育の後、でん粉粕、それのM4酵素分解物（可溶化画分）、その未分解残渣を10%添加したコレステロール飼料を２週間与え、コレステロール上昇抑制効果を観察した。表１にでん粉粕並びにM4酵素分解物の動物試験結果を示す。コントロールのセルロースの場合と比べると、でん粉粕は弱いながらも血漿コレステロール濃度

**表１　でん粉粕ならびにM4酵素分解物の動物実験**

―ラットへの給餌（10%添加）―

| | セルロース | 澱粉粕(CWM) | 可溶性画分 | 未分解残渣 |
|---|---|---|---|---|
| 体重増加（g/14 日） | 69 | 72 | 75 | 76 |
| 摂取量（g/14 日） | 159 | 163 | 157 | 160 |
| 肝臓重（g/100 g body wt） | 5.12 | 5.18 | 5.28 | 4.95 |
| 血漿脂肪（mg/100 mL） | | | | |
| 総コレステロール | 274.1 | 246.8 * | 279.5 | 258.6 |
| トリグリセライド | 204.0 | 176.9 | 130.4 ** | 150.4 |

I 群　8 ～ 10 匹、*有意水準 5%　**有意水準 1%

を抑制する効果が認められた。一方、M4酵素により可溶化されない画分は、血漿トリグリセリドを低下させる効果が認められた。

（２）固形食品素材もろみファイバーの機能性成分

焼酎製造の副産物として得られた「もろみファイバー」の水分は約80%であり、食物繊維が13%、タンパク質が4.5%で、固形分の65%が食物繊維として定量された。「もろみファイバー」には食物繊維と抗酸化物質が併せて含まれるので生活習慣病予防用の食品素材として有望と考えられた。わが国では生活習慣に起因するII型（インスリン非依存型）糖尿病が1,600万人を超した状況があり、一般に食物繊維には、糖質食品GI値を抑制する効果があるので、このタイプの糖尿病予防効果が期待できる。抗酸化作用は動脈硬化などを引き起こす体内のラジカルの発生を抑えることで、生活習慣病予防効果が有ると言われている[3)]。

## ４．バイオマスのバイオガス化・バイオエタノール化

（１）コーヒー粕のスラリー状（乾式）メタン発酵

缶コーヒーの需要の増加に伴い製造工程から排出されるコーヒー粕（水分含量、約65%:有機物含量98.5%/乾物）の処理が大きな問題となっている。研究開発当初、コーヒー粕そのものに対する研究例が皆無であったので、スラリー状態（20w/v%）のコーヒー粕を完全混合型リアクターの液状槽と嫌気性流動床リアクターであるガス生成槽からなる二相式メタン発酵法により回文式で処理試験を行った。１回の処理が終了した時点で、未分解のコーヒー粕を含む液化反応槽から引き抜き、固液分離した。上澄液は次の新しいコーヒー粕のメークアップ水として利用し、再度20w/v%のスラリー状態で乾式メタン発酵処理したところ、安定して繰り返し処理することが出来た。コーヒー粕の消化率は70%、発生ガス中のメタン含量は60 ～ 70%、全容量に対するガス発生量は液化槽（pH6制御）容量２ℓ、ガス化反応槽0.45ℓの時に1.43ℓ/dまで向上した。この値はpHを制御しなかった時の７倍に達していた。本条件でガス生成収率は、コーヒー粕中に脂質、ホロセルロース及びリグニンの分解率は、それぞれ91、70、45%であり、リグニンも一部分解されていた。

（２）生ごみの高速度メタン発酵と硫化水素の低減

生ごみのメタン発酵は、生ごみとガス撹拌型メタン発酵装置（実容量５ℓ）を用いて行った。Co2+、Ni2+及びFe2+を微量添加することにより最大有機物負荷8g/l/dを達成することができ、高速度でメタン発酵が可能となった。生ごみ中の硫化水素濃度は約1,000ppmに達していた。この時、生ごみは約85%が消化されており、脂質及びほろセルロース分解率は90%強と高く、リグニンも66%分解されていたが、タンパク質は意外と低く59%であった。バイオガス中の硫化水素濃度が高かったので、有機物負荷6g/l/dの条件でメタン発酵槽内に空気を供給し硫化水素濃度の低減させる検討を行った。その結果、バイオガス発生量に対して空気を7.5%添加することにより、バイオガス中の硫化水素濃度800 ～ 1,000ppmを５ppm以下に低減することができた。

（３）家畜ふん尿及びふん尿搾汁液のメタン発酵

家畜ふん尿は、一般的に堆肥化により肥料として利用されてるが、九州では供給量が需要量を大きく上回っている。農業環境三法で効率的な家畜ふん尿処理法の開発が謳われ、北海道を中心として家畜ふん尿のメタン発酵が行なわれるようになってきた。また最近では単独処理よりも家畜ふん尿の混合処理や、生ごみを混合した処理も行われ始めた。次に、熊本県の調査資料を参考に、表２に示すような、家畜業の盛んな阿蘇及び菊池管内の人口及び家畜頭数（豚、乳用牛）からそれぞれ混合比を決定し、メタン

**表２　家畜糞尿および混合物のメタン発酵によるサーマルリサイクル**

| 項　目 ＼ 処理条件 | 個別処理 | | | 混合物の処理 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 生ごみ：SW | 生ごみ：SM：DCM | |
| | 生ごみ | SM | DCM | 1：1 | 1：16：27（菊池） | 1：19：12（阿蘇） |
| 投入物の性状　VTS（g/l） | 195.2 | 49.4 | 52.7 | 110.1 | 54.4 | 50.0 |
| 粘度（cp） | NM | 200 | 4,900 | NM | NM | 280 |
| 消化槽タイプ、処理温度53℃ | 機械攪拌 | 固定床 | 機械攪拌 | 固定床 | | |
| 最大VTS（有機物）負荷（g/l/d） | 8.0 | 15.0 | 8.0 | 12.0 | 8.0 | 10.0 |
| 処理日数（d） | 12.5 | 3.2 | 10.4 | 9.2 | 6.8 | 5.0 |
| VTS（有機物）消化率（%） | 82 | 42 | 28 | 78 | 40 | 47 |
| バイオガス中にメタン含量（%） | 50 | 58 | 59 | 50 | 58 | 58 |
| バイオガス発生量（ml/g・供給VTS） | 875 | 460 | 250 | 730 | 250 | 464 |
| バイオガス生成収率（ml/g・消化VTS） | 1,067 | 1,095 | 893 | 936 | 625 | 987 |
| メタン発生量（ml/g・供給VTS） | 440 | 267 | 148 | 363 | 143 | 270 |

SM、豚糞尿搾汁液：DCM、乳用牛搾汁液：VTS、全有機物：NM、未測定

発酵によるバイオガス化の検討を行った。表２に示すような、家畜業の盛んな阿蘇及び菊池管内の人口及び家畜頭数（豚、乳用牛）からそれぞれの混合比を決定し、メタン発酵によるバイオガス化の検討を行った。表２は単独処理及び混合物の処理結果を示している。生ごみと乳牛搾汁液（機械撹拌型リアクター）以外は不織布を充填した固定床型リアクターを用いて高温メタン発酵処理した。生ごみのガス発生量は875ml/g-VTSと高かったが、家畜ふん尿搾汁液ではガス発生量は低下し、特に乳牛用搾汁液ではVTS消化率が28%と低かった為に250ml/g・VTSと非常に低かった。また消化された有機物当たりのガス生成収率も示したが、乳用牛搾汁液のガス生成収率は他の値に比べ893ml/g-消化VTSと低かった。単独処理からも予測されたが、乳用牛搾汁液の混合比が高くなると（菊池管内）VTS消化率も低下し、バイオガス発生量は250ml/g-VTS、バイオガス生成収率は625ml/g-消化VTSと、他の混合物のバイオガス値に比べて悪くなることが分かった。以上の結果から家畜ふん尿のメタン発酵によるサーマルリサイクルを実施する場合、他のバイオマス種との混合を考慮する必要があることがわかった。

## おわりに

20世紀は化石資源の時代であったが、21世紀はバイオマスの時代と云われている。わが国が持続的に成長していくためには、賦存するバイオマスをはじめ、食品加工残渣、有機物廃棄物など効率的に利用する技術開発が強く望まれる。バイオマスに利活用技術として、燃料やガス化以外にメタン発酵、乳酸発酵、そしてエタノール発酵などのバイオテクノロジーが挙げられる。産業界などでは有価物を再利用しようと云う気運が高まっており、今後、一層の研究開発に期待したい。

## 参考文献


１）藪　宏典：生物工学、86（5）, 239,（2008）

２）境　謙 治：BIO INDUSTRY, 26（2）,72（2009）

３）菅沼俊彦、北原兼文、藤田清貴：Food & Food Ingeredients. J. Ipan、213（8）, 699（2008）

４）木田健次：生物工学、89（1）, 2（2011）