

寝ている間にバイオエタノール発酵

生物生態機能研究領域 北本 宏子 堀田 光生

もやしもん?

高温多湿で、四季がある日本では、収穫した農産物を微生物による発酵によって貯蔵したり、おいしいものに加工する文化が育ちました。上手に仕込みをすると、農作物に付着していた複数の微生物が働いて、おいしい発酵食品ができます。優秀な微生物株を選んで保存や増殖をして、発酵がうまくいくように発酵過程で加える技術も生まれました。最近「もやしもん」という漫画がヒットしています。「もやしや」は選抜した麹菌株の保存と増幅をし、味噌醤油、酒蔵などに菌を卸してきた「麹屋」のことで、漫画の内容は、微生物を肉眼で見ることが出来る大学生が醸造学科に在籍し、おいしいお酒を造る「乳酸菌」「コウジ菌」「酵母菌」などを自然界からつまみあげるといふ展開です。この学生君が特別な能力を持っているのでしょうか?漫画では目に見えない微生物が盛んにおしゃべりしますが、注意深く耳を澄ますと、私たちにもその声が聞こえ、彼らの力を借りることができます。



© 石川雅之/講談社「もやしもん」5巻、p87

セルロース系バイオマスからエタノールを作る時の問題点

食料と競合しないセルロース系バイオマスからバイオエタノールを作る技術の開発が期待されています。サトウキビ絞汁液(主成分:糖)を原料に用いると、投入エネルギーの約8倍ものエネルギーが得られますが、トウモロコシの実(主成分:デンプン)を原料にした場合の効率は1.3倍

程度と言われます。エタノールを作る酵母菌がデンプンを直接利用できないので、デンプンを糖に分解する工程を加えることが効率を下げる大きな要因です。しかし、デンプンは植物が貯蔵するエネルギー物質で、酵素の働きで簡単に分解されブドウ糖になります。セルロースもブドウ糖の多糖ですが、植物の体を構成する丈夫な化学構造を持つために、デンプンに比べて分解にエネルギーがたくさん必要です。しかも植物体は、セルロースを丈夫にするためにペクチンやリグニンなどで固めているので、セルロース系バイオマスを分解し、エネルギー収支1以上でエタノールを作るのは大変なのです。

私たちの経験で、最もバイオエタノール生産に近い技術は焼酎醸造です。焼酎醸造過程では、発酵液(エタノール14~15%程度)を蒸留して焼酎(エタノール25%程度)を作る時に、製品の2倍程度の廃液が排出されます。この廃液は、原料に用いたイモの未分解物や酵母菌を含み、BODが3万~8万と高いのですが、固液分離が困難なため、最近まで海洋投棄されてきました。現在は投棄が禁止されたため、エネルギーをかけて熱乾燥などをして飼料などに活用しています。バイオエタノールの場合には生産量が格段に多くなることが予想されるので、廃液処理が大変な課題になるでしょう。そのほかにも、セルロース系バイオマスからエタノールを生産するときには、原料をエタノール生産に加工するまで栄養価を保ち、腐敗を防ぐ貯蔵方法が必要です。物理化学的処理での糖化が検討されていますが、この時にエネルギーや化学物質をあまり使わない方法が必要ですし、分解過程に副生する化学物質によるエタノール発酵阻害の問題も解決しなければなりません。また、蒸留には膨大なエネルギーが必要です。現在の工業用エタノール生産にかかるコストの半分は蒸留エネルギーだと言われており、さらに効率が良い蒸留方法が必要です。また、先に述べた蒸留廃液や、排出される残渣の処理といった様々な課題があります。

こういった宿題を前にして、どのようなマジックが使えるのでしょうか?先人の知恵にヒントが隠されています。

漬け物やお酒の中の微生物の働き

収穫した野菜を冬まで貯蔵するために、私たちは漬け物を作ります。野菜を密封すると、野菜に付着していた乳酸菌が、野菜に含まれる糖分を乳酸に変えて、すっぱい漬け物ができます。乳酸は野菜に付着していた腐敗菌を殺す作用があり、貯蔵できるようになります。

日本酒作りで、酵母菌を増やす過程では、まず原料の蒸米（主成分:デンプン）が麹菌のデンプン分解酵素（アミラーゼ）によって分解されます。その結果生じる糖分から乳酸菌が乳酸を作り、樽の中の雑菌を殺します。すると、酵母菌は（乳酸で殺されずに）糖分からエタノールを作りながら増えていきます。酵母の生育と共に原料の米麹を加えていくと、糖化と並行して発酵が進み、日本酒ができます。樽の中の主な微生物は、乳酸菌から酵母へ変化して酒ができるのです。

牛の餌にもヒントが！

国内で自給できる家畜飼料の大部分は牛の餌です。餌の材料となる草を収穫する時期に雨が深い日本では、7割程度を、サイレージと呼ばれる発酵飼料として貯蔵します。材料草を圧密して密閉すると、野菜の漬物と同様に乳酸発酵が起きて貯蔵できるようになります。これがサイレージです。材料草の糖分が少ない場合でも乳酸発酵がうまくいくように、材料草のセルロースを分解する酵素（セルラーゼ）を添加する技術があります。最近、耕作農家と畜産農家が連携し、休耕田で飼料イネを栽培し、サイレージ化したものを飼料として使い、家畜の排泄物を水田に還元する資源循環と農地の活用も進められています。また、サイレージ発酵で乳酸菌が雑菌を殺しても、草に付着していた酵母菌は死なずに残っていて、乳酸菌と酵母の作用で、サイレージの中に少しでもエタノールが作られることが知られています。

こういったヒントから考えると、サイレージの中で草がもっと分解されて糖分がたくさん出てくると、そこに酵母菌がいれば、生産された糖分からエタノールがたくさん作られるかもしれないというアイデアが浮かびました(図1)。草の中で日本酒をつくるようなイメージです。

サイロの中でエタノールとサイレージが作られれば、

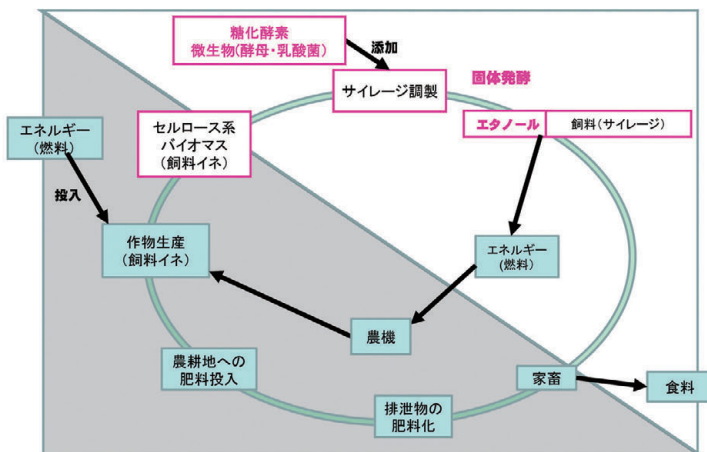


図1 農業地域の資源循環系を利用した固体発酵によるバイオエタノール生産



図2 実験室規模での固体発酵

材料の貯蔵や分解方法で悩むこともありません。材料草が収穫時に含んでいた水分を利用している低水分の発酵なので、廃液も出ませんし、蒸留に必要なエネルギーも少なく済むかもしれません。蒸留残さは乳酸を含んでいるので貯蔵性があり、牛の餌に使用します。農家が回収した粗エタノール水は、牛乳と同じように収集して、工場ですべて燃料用エタノールに蒸留すれば、大量のバイオマスを工場に輸送するエネルギーも要りません。地産地消のエネルギー生産ですが、農業地域に外から運び込むエネルギーを減らすことができるでしょう。この方法は、分解や発酵に時間がかかりますが、バイオマスを貯蔵している間に反応が進むので、急ぐ必要も無いでしょう。

サイレージの中でエタノールがどのくらいできるのか？

こんな息け者のバイオエタノール生産は、どのくらい現実的なのか、実験で試してみました(図2)。飼料イネを収穫直後、農機具で5cm程度に切断し、250gずつの規模で、糖化酵素と酵母、乳酸菌を混ぜ込んで密封し、静置しました。分解酵素をたくさん入れると20日後には発酵物産中に8%程度のエタノールが蓄積していました。これは、仕込んだバイオマスの乾物重量1tから、エタノールが213L蓄積されたと算出されます。農林水産省が目標とする100円/Lでエタノールを生産する場合の変換率は、今回用いた飼料イネでは317L/t(乾物中)と算出されるので、実験値はその7割程度を達成したことになります。用いる酵素の価格は高いので、添加する量を先ほどの1/10量に減らして調製したところ、126L/tと算出されるエタノールが蓄積しました。この時用いた酵素の費用は、市販ベースで26円/エタノールLとなります。現在、酵素の生産効率を10倍程度上昇させた研究成果も発表されており、将来は酵素の価格が下がるでしょう。今後、私たちは、発酵用容器の形状や、蒸留方法について検討していきます。また、実際のサイレージは300kg以上の規模で仕込むので、スケールを上げた時の発酵効率なども工学系の研究者と協力して調べる予定です。さらに、蒸留残さが餌としてどの程度の価値があるかも、畜産分野の研究者との共同研究で調べ、早期の実用化を目指します。