

ブドウ糖を中心に見たバイオマスの化学的利用について

利用部 バイオマスグループ 戸田 守一

■はじめに

石油の代替や二酸化炭素問題の対策の一つとしてバイオマスの活用が注目されています。バイオマスの中でも木材は世界で最大の貯蔵量を誇っており、その利用法の研究は日進月歩で進んでいます。日本は石油資源には乏しいものの木材資源が豊富ですので、石油の代替としてこの豊富な森林資源を有効に活用する技術開発はとても重要です。

木質バイオマスの成分はセルロース、ヘミセルロース、リグニン、そして樹脂などの微量の成分の4種類に大きく分けられます。木材成分の重量によるおおよその割合はそれぞれ50%、25%、25%、数%で、このうち、セルロースとヘミセルロースの一部はブドウ糖（グルコース）によって構成されているため、木質バイオマスの半分以上はブドウ糖で構成されていることになります。糖類は構成する元素が炭素、酸素、水素の3種類のみであり、これは石油の主成分と同じ炭化水素と呼ばれる構造であるため、有機化学が発達した近年ではバイオマス由来の原料としても注目されています。従って、技術的には木質バイオマスは化学製品の原料として利用することが可能なのです。

本稿ではバイオマスなどからブドウ糖をどのように得られるのか、ブドウ糖は化学的にどこまで利用を上げられるのかを述べていきます。

■ブドウ糖の原料について～セルロースとデンプン～

木材に限らず、植物の基本骨格を形成する細胞壁はセルロースでできています。樹木は生育が遅いため、セルロースの原料として生育が早い草本植物を使うための研究も行われています¹⁾。

木質バイオマス以外に目を向けると、まず思い浮かぶのが食料としてのブドウ糖です。食品中のブドウ糖は砂糖や蜂蜜などの甘いもののほか、穀物のデンプン、野菜やナタデココなどの食物繊維のセルロースに含まれています。穀物をバイオマス原料として使うことにより食料品の価格に影響を与えることが懸念されており、近年では最初から食用ではない工業用の穀物を生産する動きも見られます。なお、キシリトールなどの甘味料、ジャムなどに含まれるペクチン、寒天などの海藻由来の食物繊維なども糖類で構成されます

が、これらは主にブドウ糖以外の単糖により構成されています。木材のヘミセルロースにもブドウ糖以外の糖が多く含まれ、食品添加物の原料になっているものもあります。

このようにブドウ糖の原料となる植物細胞壁中のセルロースと穀物やいも類などに含まれるデンプンはどちらもブドウ糖で構成されていますが、性質は大きく異なります。例えばデンプンはお湯をかけると粘りが出ますが、セルロースではそのようなことはありません。その違いは何に由来するのかというと、ブドウ糖同士の結合の様式が違うためであり、それに伴って分子の立体構造が異なる形になり、さらには結晶構造などマクロな構造と性質が違うものになります。

図1にブドウ糖がとる2種類の構造を示します。赤く示した酸素が環状構造の上側に来るのがβ構造で、この構造同士のブドウ糖が結合するとセルロースになります。下側に来るとα構造となり、これ同士が結合するとデンプンになります。

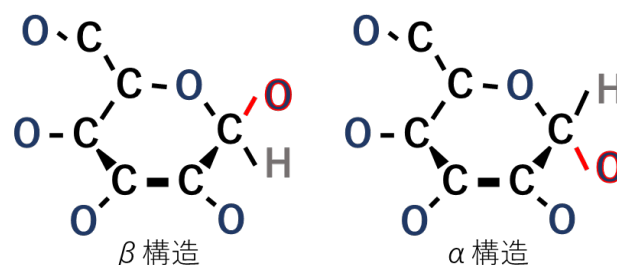


図1 ブドウ糖の2種類の構造（水素は一部省略）

このような結合様式の違いは、分子単独の安定状態の形と集まって結晶を形成した構造（結晶構造）に違いを生じます。それぞれのイメージを図2に示します。セルロース分子はほぼ板状で、結晶を形成すると分子間の隙間の少ない構造になります。この結晶構造の緊密さにより酵素や薬品などが結合部に接触しにくくなるため、水に溶けず、分解されにくい原因の一つとなっています。一方で、デンプン分子は安定状態ではらせんを形成するため、結晶にも分子間の隙間が多く、水分子が入り込みやすい形をとります。片栗粉などの純度の高いデンプンは水に溶けませんが熱を加えると溶けるようになるのは、加熱によりらせんがほどけて水分子が入り込み、ひも状になるためです。

セルロースからブドウ糖を化学的に得るためには

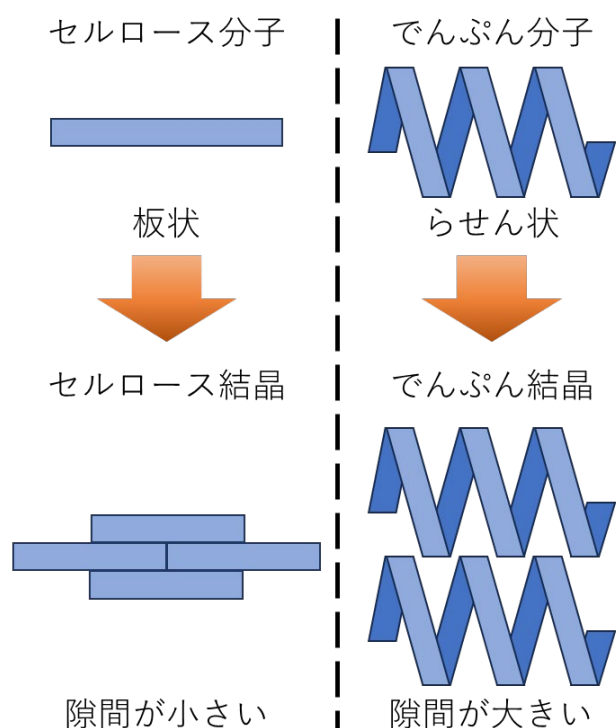


図2 セルロースとデンプンの分子の結晶の形状イメージ

まずは結晶構造を崩す必要がありますが、そのためには強力な薬品を使ったり、熱や圧力を加えたりとかなりのエネルギーが必要となります。少ないエネルギーでセルロースを分解する方法としてセルロース分解酵素を利用する方法も研究されています。

デンプンのブドウ糖を利用する技術は農作物の加工から発達してきました。デンプンを分解する基本的な流れは、デンプン分子の隙間に水分子が入り込んでひも状になるとそれぞれが絡まるため、糊のような粘りが出ます。このような状態にする工程を糊化といいます。このような状態にした後、アミラーゼという酵素で結合を加水分解すると、ブドウ糖が得られます。人間はそのブドウ糖を有用な物へと加工して利用している訳です。

■木質バイオマスからブドウ糖を得るためには

前述したように、木質バイオマスと農産物では同じブドウ糖から構成されるものでも結合の仕方一つの違いで大きく性質が異なるため、同じ工程でブドウ糖を得ることはできません。木質バイオマスからセルロース、そしてブドウ糖はどのようにして得られるのでしょうか。

まず、山林から切り出された丸太は建築材などの製材の状態にされます。この状態では木質バイオマスとして扱われることはほとんどありません。木質バイオ

マスとして扱われるのは、さらに細かく砕かれてチップや粉の状態になったものが主です。また、樹体のうち葉や枝、樹皮などは特筆されない限りは化学的利用の原料として扱われることはありません。これらには木質バイオマスの基本的な成分以外にも様々な成分が含まれているため、成分の分離・精製が困難であり、化学加工に適していないことが理由の一つです。

パルプは木材チップから物理的・化学的処理により高純度のセルロース繊維を取り出したもので、近年ではバイオマス素材の一つと見なされています。パルプ由来のセルロースの製造とその加工技術は木質バイオマスを化学的に利用する技術の中でも比較的古くから開発が進められ、代表的なものに紙やフィルターなどに使われる再生セルロースなどが挙げられます。

再生セルロースはバイオマスプラスチックの先駆けとも言えるもので、有名な化学メーカーの中にもかつては再生セルロースからレーヨンなどの繊維を生産していたところも少なくありません。良質なセルロース加工品を作るにはセルロースの純度の高さが重要であり、そのための技術も発達してきました。

そしてセルロースを構成単位までさらに細かく分解していくことでブドウ糖となります。純度の高いセルロースを原料とすることで、純度の高いブドウ糖を得やすくなるので、前述のセルロース製造技術が活かることになります。かつては木粉から糖を生産する技術を当試験場も含め日本各地で研究していたこともありましたが、技術的な問題で実用化には至りませんでした²⁾。現在でも低コストで糖を得るための研究が微生物や酵素を利用するなど様々なアプローチにより行われています。

■ブドウ糖の利用

ブドウ糖の利用先は食品や薬品、工業材料など多岐にわたります。図3はブドウ糖の生産と化学的利用のイメージを筆者の見解で描いた図です。ブドウ糖に繋がる緑の矢印は身近に使われてきた経路で、赤は今後更なる発展が期待される経路、青の経路はブドウ糖に関わらない一般的に使われている経路です。

まず食品としての利用ですが、ブドウ糖単体として甘味料に使われることは珍しく、一般的な砂糖はスクロースなどのブドウ糖とそれ以外の単糖が結合した状態で存在します。ブドウ糖として一般に目にしやすいのはサプリメントなどタブレット状にしたものではないでしょうか。サプリメントとしては人間以外にも家畜の餌に混ぜられることがあり、これは糖が間接的に人間

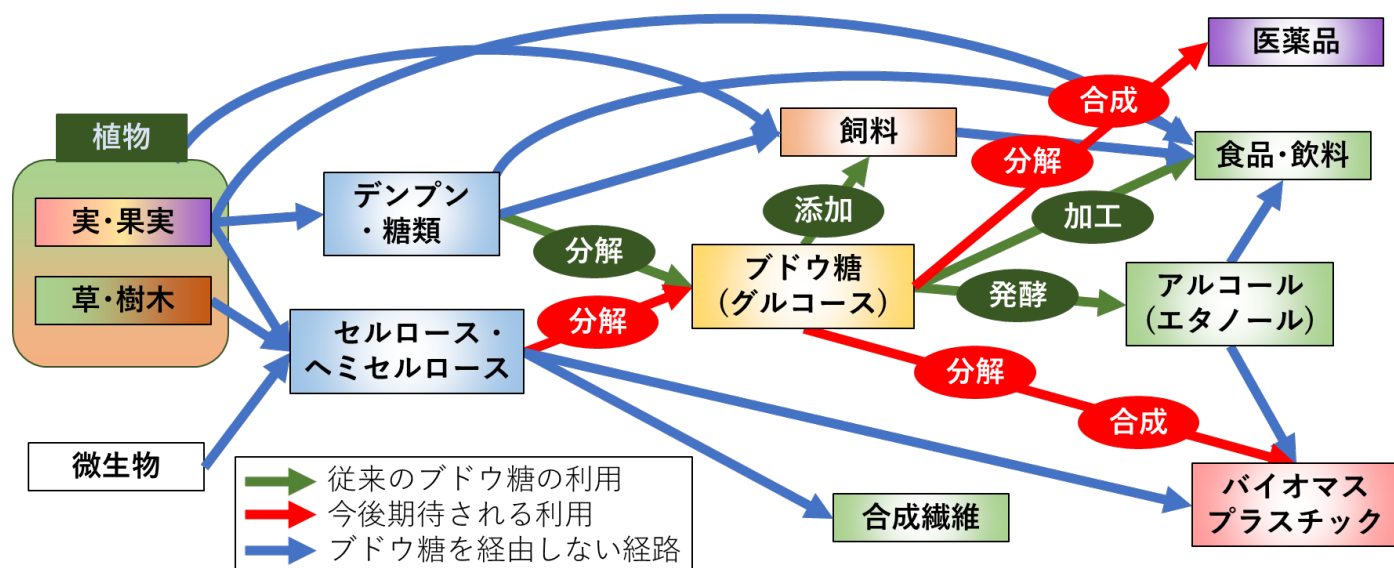


図3 ブドウ糖を中心とした化学的利用のイメージ

の食料となる経路です。なお、セルロースから化学的に作られた糖は値段や安全性などの理由により食用にとり出回することは今のところ減多にありません。

糖の発酵と密接に関わる食品は非常に多く、アルコールや酢は糖が発酵することで作られます。アルコール発酵は酒だけではなくパンなどを作る際にも重要でイーストは糖をアルコールと二酸化炭素にするため生地が膨らみます。また、工業的にも糖の発酵は重要であり、ブドウ糖から製造された酸やアルコールを原料にした石油代替品の開発が盛んに行われ、バイオマスプラスチックやバイオマス燃料などとして広がっています。例えばバイオマスプラスチックの一つであるポリ乳酸の原料である乳酸は乳酸発酵により生産され、また、バイオマスエタノールは酒造のプロセスでもあるアルコール発酵により生産されます。

ブドウ糖を原料に工業的に利用する方法は発酵以外にも様々な方法が存在し、例えばポリ乳酸の製造においても触媒によりエタノールを経由して乳酸を作る方法、さらには微生物に合成させる方法などが研究されています³⁾。

医薬品としてのブドウ糖は栄養としての直接の摂取のほか、炭化水素の構造を利用して薬品を合成するための原料として使われています。糖に多数ある水酸基は反応性が高く、様々な分子を結合することで多様な生理機能を持たせることができます。

■おわりに

本稿ではブドウ糖を中心にバイオマスの利用可能性を述べてきましたが、石油代替としてのバイオマスの利用は扱う技術の難しさと、それに伴う生産コスト

の高さが障害となります。そのような障害も、技術の進歩などによりある程度解決され、身近なところではスーパーのレジ袋などにもバイオマス由来のプラスチックを混ぜるようになるなど普及と実用化に至るようになりました。

このようにブドウ糖やそれを含む成分を得るための生産技術とそれを利用する技術は様々な分野で進められてきました。化石資源に乏しい日本ではバイオマスによる代替技術は非常に重要な研究です。バイオマス利用の技術は、さほど劇的ではないものの着実に進歩しており、今後は分野を超えて技術を活用することで、より植物バイオマスの有効利用が期待できます。今後も粘り強く研究を続けていくことで更なる発展に繋がるように我々も務めていきます。

■参考文献

- 1) 山越幸康, 北口敏弘, 上出光志, 小林広和, 福岡淳, 工業試験場報告 No.312, 4 (2013 年)
- 2) 林産試験場 HP, <https://www.hro.or.jp/forest/research/fpri/koho/default/default/biomass/4/4-7.html>, 2025 年 10 月 14 日参照
- 3) Sangho Koh, Sho Furutate, Yusuke Imai, Toshihiko Kanda, Shinji Tanaka, Yuichi Tominaga, Shunsuke Sato, Seiichi Taguchi, ACS Sustainable Chem. 12, 16, p.6145–6156 (2024), 2025 年 10 月 14 日参照