

脱炭素世界での糖獲得戦略 —世界と協調して糖を利用していくためには—

五十嵐 圭日子*

〔キーワード〕：バイオマス，セルロース，フラク
ショネーション，リファイナリー

1. バイオマスを構成する糖

「バイオマス (Biomass)」には、「特定の地域に生息する生物の総量 (the total amount of living things in a particular area)」という広義の意味と、「燃料に適した動植物の死骸 (dead plant and animal material suitable for using as fuel)」という狭義の意味がある¹⁾が、糖との関係で語られるときは前者を考えるのが適当であろう。ごく最近、地球上に存在するバイオマスの総量が、炭素換算で約 550Gt C (Gt は 10 億トン、C は炭素換算) であるとされ、そのうちの 450Gt C 程度が陸上植物であると報告された (図 1)²⁾。同じ報告の中では、バイオマスとしてのヒトの総量が 0.06Gt C で、野生哺乳類の総量の 10 倍近くあり、家畜はさらにその 1.5 倍にも達するという結果も示されている。すなわち、私たち人間が糖を含む植物を主食、すなわちエネルギー源として利用していること、さらに蛋白質

源として利用している家畜にも飼料として糖を含む穀物が大量に用いられている現状を考えると、地球上に存在する糖を今後どのように利用していくかは、人類の双肩にかかっていると言える。

その一方で、陸上植物の大部分を占めるのは、グルコースのホモポリマー (単一の構成単位からなる高分子化合物) であるセルロースである。セルロースは植物細胞壁の主成分であり、表 1 に示すように多くの陸上植物で 4 割程度を構成していることから、地球上におけるバイオマス 150～200Gt C 程度を占めることになる。セルロースに次いで多いのが、広葉樹や草本のヘミセルロースの主成分であるキシランの主鎖を構成するキシロース、針葉樹の代表的なヘミセルロースであるグルコマンナンを構成するマンノースとなる。この中でマンノースは、グルコースと同様炭素を分子内に六個持つ「六炭糖 (ヘキソース)」であるため、ヘキソキナーゼによってマンノース 6-リン酸にされた後、マンノース 6-リン酸イソメラーゼによりフラクトース 6-リン酸に変換されて、解糖系で異

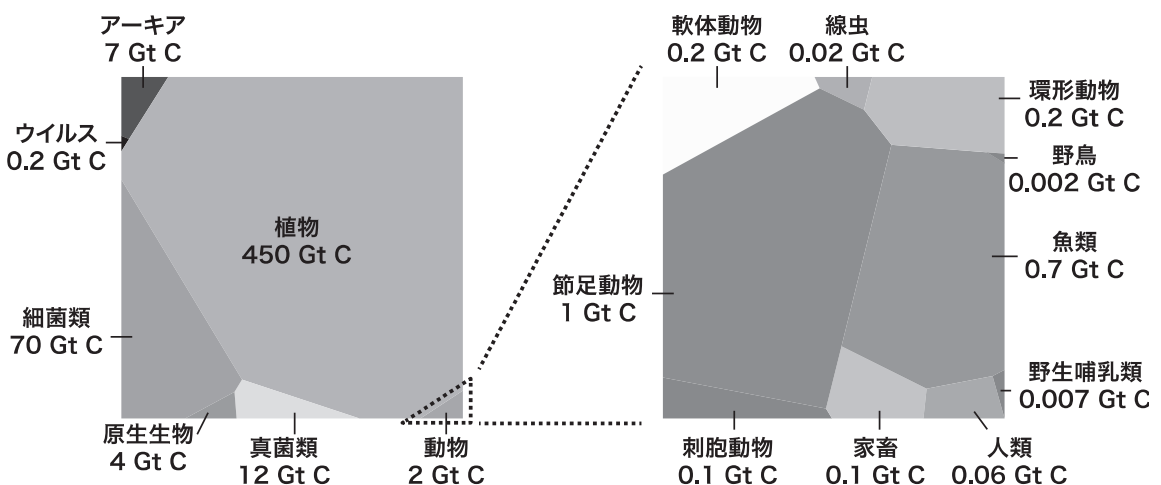


図 1 地球上のバイオマスを構成する生物種²⁾

表 1 代表的な広葉樹、針葉樹およびイネ科植物における糖組成

	ブナ ³⁾	トウヒ ⁴⁾	ススキ ^{5, 6)}
Cellulose	36.3	44.0	38.2
Hemicellulose	34.7	23.9	24.3
Arabinose	0.72	1.48	1.80
Xylose	25.8	5.98	19.0
Galactose	1.05	2.46	0.40
Glucose	1.91	3.06	0.27
Mannose	1.60	8.62	0.10
Rhamnose	0.63	0.26	0.00

化される。一方、キシロースは五炭糖（ペントース）で、キシロース→キシロース 5-リン酸を経てペントースリン酸経路によって代謝される。このようにヘキソースとペントースでは、生物による代謝経路が明らかに異なるため、バイオマスから得られる糖を人類が利用していくときに、単純にある糖の賦存量だけではなく、様々な観点から利用の方向性を考えることが重要である。

2. セルロース系バイオマスの分画技術

現在、脱炭素社会の構築を目指して、セルロース系バイオマスからのバイオリファイナリーに関する研究が盛んに行われている。日本国内における原油の需要 2 億キロリットルのうち、主な用途であるガソリンの需要が約 5,000 万キロリットル（全需要の約 26%、二酸化炭素換算で約 117Mt（Mt は 100 万 t））⁷⁾ であるのに対して、化成品の原料となるナフサとして 4,400 万キロリットル（22%、二酸化炭素換算で約 102Mt）も使われており、さらに将来的な自動車の燃費向上や電気自動車の普及等を考えたとき、今後バイオマスの用途が燃料生産からプラスチック原料等の化成品生産（リファイナリー）へと移行していくことが想像される。セルロース系バイオマスのリファイナリーという考え方は、製紙産業や繊維産業に代表されるように決して新しいものではなく、むしろ人間社会で古くから利用されてきた化学プロセスの一つであると言える。しかしながら、現状、バイオマスからのプラスチック生産のほとんどが、抽出した油や糖成分をそのまま、もしくは構成する糖成分を単糖に分解、モノマーに変換し重合させてプラスチックを得ているが、前者の場合は多くが食糧との競合であること、後者では変換過程

で経済性とエネルギー効率が低くなることが問題となっている。そこで、バイオマスを組織構造や分子量の大きさによってカスケード利用ができるよう技術開発をすること、すなわち、未利用バイオマスを酵素等によって変換する際、繊維として残りやすい部分は繊維として利用し、化学的に分解しにくい成分は多糖やオリゴ糖として、そして分解しやすい部分を単糖として利用するための技術開発が求められている。

現状セルロース系バイオマスを最も大量に変換している産業は製紙産業であるが、日本製紙連合会の最新報告によると、2024 年の紙・板紙の内需量は 2,097 万 t 程度になると予想されている。2000 年には 3,197 万 t の紙・板紙が使われていたことを考えると、今世紀に入ってから我が国における紙の使用量は 2/3 にまで落ちたことが分かる⁸⁾。一方で、我が国は世界的に見て古紙回収率と利用率が高く、2023 年の数字で 82%が回収され、67%が利用されており⁹⁾、その差分だけを見ても 200 万 t、輸出入まで全てを考え合わせると、800 万炭素 t を超える未利用バイオマスが存在する。そこからバイオマスプラスチックや代替素材を生産できると、我が国が掲げている「2030 年までにバイオプラスチック導入約 200 万 t」という数字に大きく貢献することとなるために、昨今パルプや古紙からのものづくりが大きく注目されることとなっている。

そこで演者らは、廃棄紙や余剰パルプを原料として単糖、オリゴ糖、多糖、繊維残渣を自在の比率で作り分けられる技術開発を行っており、その鍵プロセスとしてセルロースやヘミセルロースを加水分解する酵素を使っている。酵素を使ったセルロース系バイオマスの変換技術は、主にバイオエタノールを生産する目的で古くは第二次世界大戦時、さらに 1970 年代の石油ショックの後も 1980 年代にかけて盛んに研究が行われたが、石油価格の安定化、化学工業の進展、酵素の生産性や価格などの観点から実用化に至らなかった。一方、1990 年代のバイオテクノロジーの進展と 2000 年代のゲノム情報の利用、さらに硫酸などを用いた化学的糖化の環境へのインパクト等の複合的な必要性から、今世紀に入ってから酵素を用いて糖化することが一般的となっている。しかしながら、セルロース自体は元来安定な化合物であり、酵素

バイオプラスチック社会普及性を支える バイオマスの変換技術開発

研究機関：東京大学、大阪大学、琉球大学

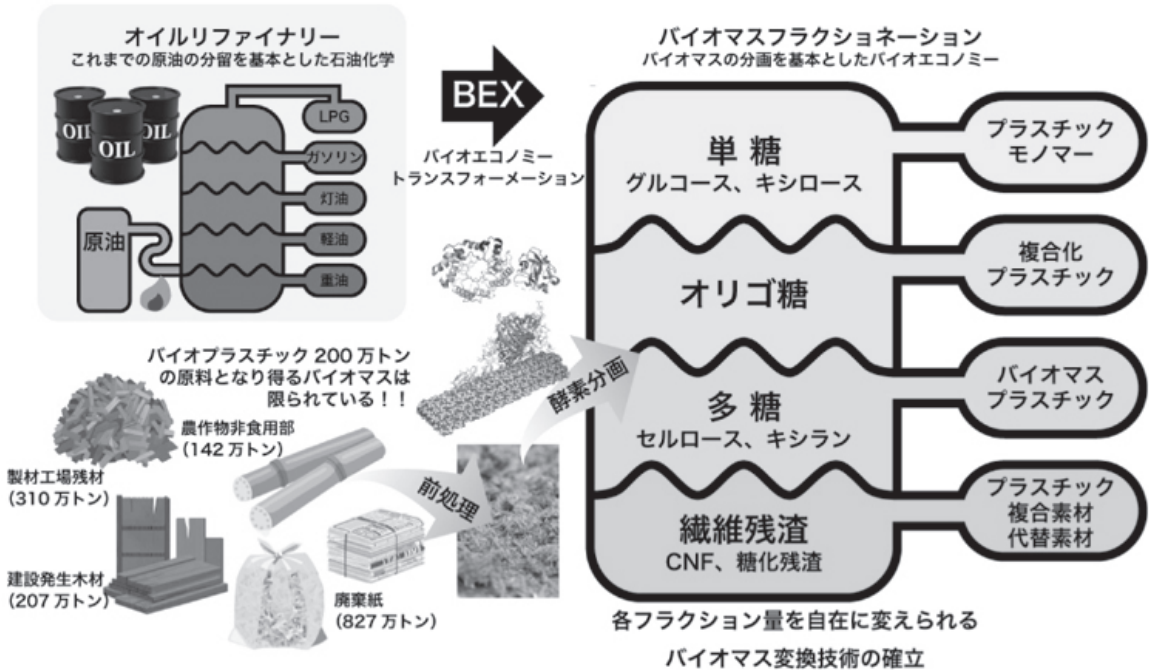


図2 環境再生保全機構（ERCA）環境研究総合推進費で進められているバイオマスフラクショネーション産業に向けたアプローチ

の反応効率も硫酸などの協賛と比較すると必ずしも高くないことから、セルロース系バイオマスに含まれる多糖を確実に単糖にまで分解しようとすると多量な酵素を使わなければならない、結局セルロース系バイオマスを利用するためのボトルネックが酵素糖化工程に集約されることとなっている。

3. 脱炭素世界での糖獲得戦略

昨今、NEDO が先導する「バイオものづくり」関連の予算のもと、多くの企業がバイオマスからのものづくりに取り組み始めており、2015 年からバイオエコノミーを進めるべきであると主張してきた演者にとっては喜ばしい状況であると言える。その一方で、大きな落とし穴があると思っているのが、1) 結局日本はどれだけのバイオマスを獲得できるのか、2) バイオマスを糖化するための酵素をどのように供給するのかという点が挙げられる。

まず1) であるが、我が国が収集しているデータ

を色々見てみると、自国だけでなく他国にどのようなバイオマスがあるのか、すなわち「賦存量」という考え方に関してはきちんとした資料がある気がするが、そのような賦存量に対して「親日度」を乗じなくて良いのかという質問を投げかけたい。これはバイオマスに限らず総ての資源に対して言えることなのだが、そこに資源があるからと言って、私達がアクセスできるのかというのは別問題ということである。すなわち、我が国の糖獲得戦略は、確実に世界情勢と世界地図を見ながら行わなければならないと思うわけである。

次に2) であるが、演者の推計ではセルロース系バイオマスの糖化のためには、最低でもバイオマスの1重量%（1/100）に相当する酵素が必要になる。すなわち、今後バイオマスを脱炭素のために使っていくとして、例えば1000万tのバイオマスを相手にしようとする、10万tの酵素を用いてうまくいけば400-500万tの糖が得られる。それを

発酵させてなにかしらの物質を作ったとして、数百万トン、これがバイオプラスチックであれば200万トンを動かすためには10万t程度の酵素が必要ということになるのである。私達が頻繁に使う子囊菌（カビ）*Trichoderma reesei* による酵素生産性を最大の100g/Lに見積もったとしても、100万m³の培養槽が必要になることを政府が理解しているかということなのである。

技術も大切であるが、技術の方向性を決めるためにも戦略はもっと重要である、そのような演者の意見を理解していただけたら幸いである。

引用文献

- 1) <https://dictionary.cambridge.org/ja/dictionary/english/biomass>, Cambridge Advanced Learner's Dictionary & Thesaurus, © Cambridge University Press 2023
- 2) Bar-On, Y. M. et al (2018) Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 115 (25), 6506-6511.
- 3) Willför, S. et al (2005) Wood Sci. Technol. 39, 601-617.
- 4) Willför, S. et al (2005) Wood Sci. Technol. 39, 245-257.
- 5) De Vrije et al (2002) Int. J. Hydrog. Energy 27, 1381-1390.
- 6) Schäfer, J. et al (2019) GCB Bioenergy 11, 191-205.
- 7) 2018年度資源・エネルギー統計.