

## 2050年カーボンニュートラル実現に向けてのバイオマス貢献

## Part II バイオマスの活用

飯塚泰雄

## はじめに

有機化学の基礎教科書「パイン有機化学 [II]」に、「緑色植物中で水と二酸化炭素とがヘキソースを合成する化学反応は自由エネルギーを吸収する方向に進み、日光がこの過程のエネルギーを供給する。反応は



$$\Delta G^0 \doteq 686 \text{ kcal/mol} (2870 \text{ kJ/mol})$$

に従って進む」と記述されている[1]。バイオマスの大部分を占める植物は、今、この時において1モルのブドウ糖生成につき、太陽光から2,870kJのエネルギーを吸収、同時にC-H、C-O結合を含む有機化合物としてCO<sub>2</sub>を固定、蓄積し続けている。化石燃料は太古の植物による光合成作用の遺産であり、バイオマスに比べて脱水が進行している分、エネルギー密度が高く、且つ局在している。このことが化石燃料の大量消費につながり、近年の大気中のCO<sub>2</sub>濃度増加、気候変動を引き起こす要因となっている。大量消費は、化石資源自体の枯渇につながり、いずれは現代の「化石資源エネルギー時代」は終焉を迎える[2]。一方、現代に暮らす我々は、石油石炭等の化石資源を使って生活に必要なプラスチック製品等も得てい

る。従って、持続可能な社会を構築していくためには、太陽電池のようなエネルギー変換系の開発だけでは不十分である[2]。

太陽電池や水の光分解触媒と異なり、植物は自生し、自己成長し、且つ降雨に恵まれた日本のほぼ全国土を覆っている。このように自己成長する植物が作り出すC-H、C-O結合をエネルギー源、且つ化学工業原料として利用する文明を構築していくべき時が来ている。

この号Part IIでは、日本国土に育つバイオマスに蓄積されるエネルギー量を概算した結果を紹介し、日本の全エネルギー消費量と比較する。しかし、山野に育つ草木の全てをエネルギー源として活用できるわけではない。人の手が届き、活用できるバイオマスの量を賦存量と呼ぶ。賦存量としてのバイオマスの活用についても述べたい。

## 1. 国土に育つバイオマスに蓄積されるエネルギー量と日本の全エネルギー消費量

### 1-1 植物の太陽エネルギー変換効率—太陽電池との比較

Part Iにおいて、太陽エネルギー変換効率15%の太陽電池により日本の全エネルギー需要を満たすには、計算上四国4県程の

面積が必要であり、カーボンニュートラル実現のための再生可能エネルギー源として太陽電池に 100%依存することは非現実的であることを述べた。バイオマスをエネルギー資源とする場合、植物の太陽エネルギー捕捉効率は太陽電池に比べて、どれくらいの値であろうか？

### 【トウモロコシ、サトウキビの太陽エネルギー捕捉効率】

園池は、葉表面積当たりの CO<sub>2</sub> 吸収量として最大の値を示すトウモロコシ、サトウキビについて“50μmol CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> s”という値を示し、生理的標準条件下において CO<sub>2</sub> 1mol が糖に変換されるとき自由エネルギー変化は 4.8×10<sup>5</sup> J であるところから、これらの植物の太陽エネルギー捕捉効率は 24 J/s=24 W と記している[2]。(1-1)式は、1モルのブドウ糖生成につき、太陽光から 2,870kJ のエネルギーを吸収することを示しているから、CO<sub>2</sub> 1mol 当たりの ΔG<sup>0</sup> 変化は、478kJ=4.8×10<sup>5</sup>J となり、園池の記述は(1-1)式に示す反応と自由エネルギー変化によっていることがわかる。この値にトウモロコシ、サトウキビが 1 秒間あたりに太陽光を吸収して CO<sub>2</sub> を固定する速度として報告している値、“50μmol CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> s”を掛けると、これらの植物が CO<sub>2</sub> を吸収、太陽光エネルギーを捕捉する効率の値

$$4.8 \times 10^5 \text{ J/mol} \times 50 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2 \text{ s} = 24 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} = 24 \text{ W/m}^2$$

が導かれる。

この値を使うと、植物と太陽電池の太陽エネルギー吸収効率を比較することが出来る。太陽電池の場合、北緯 35 度における夏至南中時の大気圏上部の太陽エネルギー値  $s = S \times \sin 78.4^\circ = 0.98S = 1338 \text{ W/m}^2$  の 70%

が地上に到達し、変換効率 15%での発電量は、 $1338 \times 0.7 \times 0.15 = 140 \text{ W/m}^2$  と計算される。従って、トウモロコシ、サトウキビの太陽エネルギー吸収効率は、太陽電池のその 17%、即ち約 1/6 と計算される。又地上に注がれる太陽エネルギーの吸収効率として  $24 / (1338 \times 0.7) = 2.56\%$  という値が得られる。

トウモロコシ、サトウキビは代表的なエネルギー作物であり、数値的には、四国の 6 倍の面積の土地にトウモロコシ、サトウキビを植え付ければ日本のエネルギー需要と対応する。多くの植物はこの値の半分以下～1/10 程度であるが、この数値は日本国土に自生している植物が吸収している太陽エネルギーは、現在の日本の全エネルギー需要にほぼ匹敵することを示している。

植物と太陽電池を較べた場合、植物においては太陽光の強さの光りで光合成速度がほぼ飽和しているのに対し、太陽電池では太陽光の強さでもまだ出力が光量に比例する。逆に、光が弱くなると、太陽電池の出力はそれに比例して低下するが、植物の光合成の場合はその低下の割合は小さい。曇りで光が弱い場合、朝夕において太陽光の強さが弱まるといった実際の光り環境のもとでは、太陽電池の出力効率と植物の光合成によるエネルギー吸収効率の差は小さくなると予想される[2]。

### 1-2 総生産量と純生産量

(1-1)式は CO<sub>2</sub> 1mol に対して 1/6 mol の C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> が生成蓄積されることを示している。50μmolCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>s の吸収速度では、太陽光吸収に伴い、ブドウ糖 C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>(分子量 180) が単位時間、単位面積当たり、1.5mg/m<sup>2</sup>s 生成される[2]。しかし、この炭酸同化作用で生成されたブドウ糖に蓄えら

れた太陽エネルギーのすべてを利用できるわけではない。ブドウ糖の一部は、植物体内の細胞呼吸において



$$\Delta G^0 \div -1173 \text{ kcal/mol} (-4928 \text{ kJ/mol})$$

と表され、エネルギーを生み出す異化と呼ばれる反応に使用され、最終的に H<sub>2</sub>O と CO<sub>2</sub> に分解される。生み出されたエネルギーの多くは植物体自体を温める熱エネルギーとして放出されるが、一部はエネルギー的に不利な ADP (アデノシン二リン酸) とリン酸から ATP (アデノシン三リン酸) を生成する反応に使用される[3,4]。合成された ATP の化学エネルギーは、(1-1)式の炭酸同化作用で生み出されたブドウ糖の多くを、酵素を媒介としてデンプン、ショ糖、セルロース等に変換する反応に使用され、これらの生成物は植物体自体を構成するとともに吸収した太陽エネルギーを我々が利用可能なエネルギーとして蓄積する[3,4]。

即ち、植物の生産は総生産と純生産という二つの概念で表される。総生産とは葉緑体で太陽光を吸収して CO<sub>2</sub> と H<sub>2</sub>O から簡単な炭水化物 (ブドウ糖) を合成する(1-1)式の反応で生成される炭水化物の総量を言う。合成された炭水化物の一部は、(1-2)式で示される植物体内での細胞呼吸に使用され、余剰分は複雑な炭水化物に再合成され、更に別に吸収された栄養塩類とともにタンパク質、その他、セルロース、ヘミセルロース、リグニン等の植物体を構成する物質を作り上げ、これにより太陽から吸収されたエネルギーを化学エネルギーとして蓄える。これを純生産と呼んでおり、植生動物や人間の生存は植物の作り出す純生産にその生存の百分を依存している[5]。

$$\text{純生産量} = \text{総生産量} - \text{細胞呼吸量} \quad (1-3)$$

総生産量に対する純生産量の比、総生産、純生産の太陽エネルギー効率(%)は植物の種類により異なる。表 1 に、種々の植物群落のエネルギー比率を比較する[5]。

**表 1 種々の植物群落のエネルギー効率の比較[5]**

	純生産量 / 総生産量	総生産量のエネルギー効率 (%)	純生産量のエネルギー効率 (%)
森林群落	0.25～ 0.50	2.0～ 3.5	0.5～ 1.5
多年生草木群	0.45～ 0.55	1.0～ 2.0	0.5～ 1.0
一年生草木及び作物群落	0.55～ 0.70	～1.5	～1.0

### 1-3 日本全国土における植生区分別面積と純生産量

植物の活動は一年周期で繰り返される。再生可能エネルギー資源としてのバイオマスの可能性を検討する場合、日本全国土において植物が一年を通じて利用可能な形として太陽エネルギーを蓄積するところの純生産量を把握する必要がある。この量は、岩城が 1981 年に日本の各地域における植物性バイオマス資源の分布について行った調査報告によって知ることが出来る[6]。岩城は、全国を 30 種類の植生タイプに分け、昭和 50 年環境庁の行った第 1 回緑の国勢調査に基づき、植生区分別にその面積、及び年間純生産量の推定を行った。表 2 の第 2 列目と 3 列目は、それぞれの植生区分とその

集計面積を示している。植生区分別面積は、全国を  $1\text{km}^2$  のメッシュに分け、国勢調査に基づき植物群落毎の面積をメッシュの数で集計することによって求めている。第 5 列目に示す各植生区分における年間の純生産量は、第 4 列目に示す吉良等によって報告された植生区分別単位生産量、即ち各植生における単位面積当たりの年間純生産量 (=乾重  $\text{t}/\text{ha}\cdot\text{年}$ ) の値を用い[7]、これに第 3 列目に示す各区分の植生面積を乗じることによって求めている。第 5 列目の最下行に各植生区分の年間純生産量の集計値、即ち日本全国における年間バイオマス純生産量の値、即ち 3.9 億 ton が示されている。

#### 1-4 日本国土においてバイオマスに蓄積される太陽エネルギー量と吸収 $\text{CO}_2$ 量

表 2 の第 6 列は、日本国土においてバイオマスに蓄積される太陽エネルギー量を推定するために、岩城の用いた植物体乾量  $1\text{g}$  当たり  $4.2\text{kcal}$  との換算仮定値を使って、各植生区分について求められた純生産量をエネルギー値に換算した結果を示す[6,8]。第 6 列目最下行に示すその全国集計の値、即ち、 $6840.5\text{PJ}/\text{年}$  が日本国土において一年間にバイオマスに蓄積される太陽エネルギー量と推定される。

植物の光合成作用は  $\text{CO}_2$  を吸収して行われる。各植生区分での純生産は全てセルロース ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ ) として蓄積されると仮定すると、(1-1)式) によれば  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  1 モル当たり、6 モルの  $\text{CO}_2$  が吸収される。そこで第 5 列目の純生産量をセルロースモル数に換算、次いでセルロースの 6 倍のモル数の  $\text{CO}_2$  を求め、これから日本国土において一年間にバイオマス中に吸収される  $\text{CO}_2$  量を

計算した。表 2 の第 7 列目に各植生区分での吸収  $\text{CO}_2$  量を示す。その最下行の集計値、即ち 6.35 億トンが日本国土においてバイオマスに一年間に吸収蓄積される  $\text{CO}_2$  量と推定される。

表 3 は、日本国土において一年間にバイオマスに蓄積される太陽エネルギー量及び吸収  $\text{CO}_2$  量をそれぞれ原子力・エネルギー図面集に示される 2020 年度の日本のエネルギー消費量[9]及び総  $\text{CO}_2$  排出量[10]と比較した結果を示す。日本国土の植物が一年間に純生産量の形で太陽エネルギーを固定蓄積する量は、日本の全エネルギー消費量の約 5 割強に匹敵する。一方、国土に生えている植物は、日本社会が現在化石資源を燃やし排出している  $\text{CO}_2$  の 6 割に相当する量を吸収している。しかし、この量を 2050 年カーボンニュートラルの目指す  $\text{CO}_2$  排出量削減目標量に加えることは出来ない。理由の一つは、京都議定書ではすべての森林の  $\text{CO}_2$  吸収量を排出削減量に算入できるわけではなく、1990 年以降に新たに植林したり、再造林することで作られた森林による吸収量を算入することが出来るからである[11]。更に、植物は環境中の  $\text{H}_2\text{O}$  と  $\text{CO}_2$  を用いて、食物の一次生産者として有機物を生み出すが、生産された有機物は、二次生産者 (=人間を含む動物) の食物となり、以降、順次高次の生産者の食物として利用され、最後にカビやバクテリア等の腐生生物 (=分解者、還元者) の営みを介して  $\text{CO}_2$  と  $\text{H}_2\text{O}$  として環境中に戻されるからである [5]。

表2 日本の植生区分別面積、純生産量、エネルギー蓄積量、CO<sub>2</sub>吸収量[6,7]

	植生	面積/km <sup>2</sup>	単位生産 量/乾量 t/h・年)	純生産量 /10 <sup>3</sup> t・Y <sup>-1</sup>	蓄積エネル ギー量 /PJ・Y <sup>-1</sup>	CO <sub>2</sub> 吸収量 /万 ton・Y <sup>-1</sup>
1	常緑広葉樹	11,380	20	22760	400	3709
2	ブナ林	26,217	9	23595	414	3845
3	カバ林	7,230	9	6507	114	1060
4	ナラ林	69,073	9	62166	1091	10131
5	天然針葉樹林	31,996	11	35196	618	5736
6	マツ林	38,516	14	53922	947	8787
7	スギ・ヒノキ林	47,671	14	66739	1172	10876
8	落葉針葉樹	10,303	10	10303	181	1679
9	高山低木林	1,059	5	530	9	86
10	亜熱帯低木	125	8	100	2	16
11	低山常緑低木林	2	8	2	0.03	0.3
12	低山落葉低木林	1,303	6	782	14	127
13	竹林	206	10	206	3.6	34
14	常緑果樹園	2,593	10	2593	46	423
15	茶畑	362	7	253	4.4	41
16	落葉果樹園	1,558	10	1558	27	254
17	桑畑	923	10	923	16	150
18	畑地	21,245	12	25494	448	4155
19	水田	47,515	11	52267	918	8518
20	休耕地	143	5	72	1.3	12
21	ササ草原	3,896	8	3117	54.7	508
22	禾木草原	9,066	8	7253	127	1182
23	両性的草原	1,450	15	2175	38	354
24	水中草原	57	1	6	0.1	0.9
25	特殊草原	469	1	47	0.8	8
26	大型植物群	513	15	770	13.5	125
27	小型植物群	553	1	55	0.97	9
28	人口草原	8,580	8	6864	120	1119
29	都市緑地	4,394	5	2197	38	358
30	その他	11,905	1	1191	21	194
		360,303		389,640	6840.5	63497

表 3 バイオマスに蓄積される太陽エネルギー量と吸収 CO<sub>2</sub> 量

バイオマスエネルギー総蓄積量/2020 年度総エネルギー消費量[10]	バイオマス吸収 CO <sub>2</sub> 量/2020 年度総 CO <sub>2</sub> 排出量[9]	バイオマスエネルギー総蓄積量/年間太陽エネルギー照射量
$\frac{6840PJ}{12082PJ}$ =0.54	$\frac{6.35 \text{ 億Ton}}{10.4 \text{ 億Ton}}$ =0.61	$\frac{6840 \times 10^{15}}{2.88 \times 10^{21}} \times 100 = 0.24$

この食物連鎖の中で、従属栄養者としての動物によって同化された有機物のエネルギーは動物組織の維持、増殖のためのエネルギー、及び呼吸の熱として失われる[5]。例えば、春に木々の梢に吹き出す若葉や、大地に芽生える草木は、夏に向かって成長し、秋になると実をつけ、動物に食べられるか、地上に落ちる。気温が下がると、枯葉となり、冬を越して一年経つとすっかり消え去っている。バイオマスのエネルギー利用は、植物がその成長過程において吸い込んだ太陽エネルギーを放出しながら、環境中に還元されていくルートの一部を変更し、有機物の一部を取り出し、新しくエネルギーとして利用するシステムを構築することと見なすことが出来る[5]。バイオマスをエネルギー利用した分、化石エネルギー資源の使用を減らすことが出来、これによりカーボンニュートラルに貢献できる。

表 3 に、純生産量としてバイオマスに捕捉蓄積される太陽エネルギー量を一年間に日本に注がれる照射太陽エネルギー総量と

比較した結果を示す。バイオマスの太陽光エネルギー捕収率として、0.24%という値になる。この見積もり値は、トウモロコシ、サトウキビについて見積もった値に比べると一桁低い。植物の太陽エネルギー固定蓄積効率は、種類に大きく依存している。トウモロコシ、サトウキビは、普通に見かける草木に比べると背丈がかなり大きい。最近、中東からインドが原産とされる多年生の超多収イネ科作物、エリアンサスが資源作物として有望視されている。これまでの研究により、越冬できる気象条件であれば長期的な周年栽培が可能、4~5mの高さまで大きくなり、収量が高く、CO<sub>2</sub> 固定能が大きいこと、雨水で栽培可能なこと、更に深い根茎を張ることから有機物を土壌中に蓄積できるので農地転用が可能、且つ耕作放棄された土地を農地として維持するための管理耕作作物であること等から、計画的安定供給が可能なバイオマス資源作物であること等が分かってきている [12,13]。

植物の太陽光エネルギー捕集効率は、生育時期により大きく変わる。「一般に一年生草本群落の純生産量のエネルギー効率は、最大でも 1%程度であるが、生育期間中の最大効率で見れば、作物でも 4~5%に達する場合もある」との記述もある[5]。サトウキビの太陽エネルギー捕集効率が約 2.6%との計算であるから、4~5%はその約 2 倍にあたる。植物は、スピードは遅いが、人間よりもはるかに太陽エネルギー利用に長けている。太陽電池とは異なり、好適な環境下にある陸上植生の殆どは葉を空間一杯に広げ、1m<sup>2</sup> 当たり 3~12m<sup>2</sup> の葉面積を有している（必要面積は 1/3~1/12 に縮小する）[5]。日本が水資源に恵まれ、全国土がほぼ

植物に覆われている事実を直視し、2050年のカーボンニュートラルも見据え、バイオマスのエネルギー資源として活用、開発を進めていくべきではなかろうか。

## 2. 賦存量としてのバイオマスの活用

### 2-1. 賦存量 (=利用可能なバイオマス資源量)

岩城によれば、日本国土の大部分は林地68%、耕地21%、草地7%と96%が植物で覆われ、バイオマスの純生産量は3億8964万トンと推定され[6]、蓄積されるエネルギーは、2020年度の日本のエネルギー消費量の約5割強に相当することを上述した。しかし、蓄積されたエネルギーをそのまま全量エネルギー資源に回せるわけではない。純生産量として産出されたバイオマス量推定値には、人里離れた山奥に自生する植物も含まれている。ある地域を対象として何らかの技術で働きかけることによって人間生存のために利用できる資源量を賦存量という[5]。

化石資源代替エネルギー源としてバイオマスの活用を考える場合、その賦存量を評価することが重要である。表4は、2002年12月に策定・発足した「バイオマス・ニッポン総合戦略」[14]に基づき、農林水産省が把握している2006年時点におけるバイオマス賦存量と利活用状況を示している[15]。賦存量は、廃棄物系と未利用系に類別され、前者には、家畜排泄物、食品廃棄物、廃紙、黒液、下水汚泥、製材工場等廃材、建設発生木材、また後者として林地残材、農作物非食用部が取り上げられている。エネルギー源とすることを目的とする「資源作物」も賦存量バイオマスの対象とされているが、現在、栽

培されている量が僅かなためか、表4の項目に入っていない。表4に示される賦存量の合計は、2億4000万トンとなり、表2で求めた日本全国土における純生産量3億9000万トンの約62%、国民一人あたり約2ton/人となる。仮にセルロースと仮定してエネルギー換算すれば、表2の第6列目最下行に示す値の62%、4210PJと計算され、この値は2020年度の日本のエネルギー消費量12082PJの35%に相当する。

### 2-2 バイオマスタウン構想とその評価

#### 【バイオマスタウン構想】

バイオマス・ニッポン総合戦略には、その策定の背景として、化石資源の枯渇を見据え、①地球温暖化の防止、②循環型社会の形成、③バイオマス活用による競争力のある新たな戦略的産業の育成、④農林漁業、農山漁村の活性化を目的として、バイオマスをエネルギーや製品の原料として最大限に活用することが謳われている[14]。バイオマスは、「広く、薄く」存在し、化石資源に比べ水分を多く含んでいる分エネルギー密度が低く、かさばる等の扱いにくさから収集輸送が困難である等の特性がある。バイオマスの利活用を進めるためには、必然的に地域分散型利用システムを構築する必要がある。そのために市町村の自治体を中心とするバイオマスタウン構想が打ち出され、2005年バイオマスタウンの募集が開始された。

この政策では、バイオマスタウンは、1. バイオマスの発生から利用までが効率的なプロセスで結ばれた総合的利活用システムが構築されている、2. 廃棄物系バイオマスの90%以上、未利用系バイオマスの40%以上の活用が目標とされている[16,17]。各自

治体から提出された構想書が目標に合致し

表 4 国内におけるバイオマス賦存量と利活用状況[15]

	対象バイオマス	年間発生量	利活用の状況
廃棄物系	家畜排せつ物	約 8,900 万トン	約 90%堆肥利用 メタノール発酵を通じたバイオガス発電
	食品廃棄物	約 2,200 万トン	堆肥、飼料利用約 20%、残り 80%は焼却・埋め立て処理
	廃棄紙	約 1,600 万トン	紙消費量 3,600 万トンの半分以上はリサイクル。残りの約 1,600 万トンは、回収されず、その大半が焼却、余熱利用
	黒液（乾燥重量）	約 1,400 万トン	殆どがエネルギー利用（主に直接燃焼）
	下水汚泥（濃縮汚泥ベース）	約 7,500 万トン	建設資材・堆肥利用約 64%、埋め立て約 36%
	製材工場等残材	約 500 万トン	エネルギー・堆肥利用約 90%
	建設発生木材	約 460 万トン	製紙利用・ボード原料・家畜敷料、エネルギー（直接燃焼）、約 60%
未利用系	林地残材	約 370 万トン	殆ど未利用
	農作物非食用部（稲ワラ、籾殻など）	約 1,300 万トン	堆肥、飼料、畜舎敷き藁など約 30%、残りは農地にすき込まれている

2011 年 4 月までには 318 地区の自治体がバイオマスタウンとして認定を受け、助成金が支給され事業を開始するに至っている。表 4 の第 4 列目に各バイオマスについての利活用状況を示す[15]。家畜排せつ物は、約 90%が堆肥として農地に還元活用されており、残りは、メタン発酵を通じたバイオガス発電に利用されている。この例に見られるように、バイオマスは原料として製品に転換して利用される場合とエネルギーに転換されて利用される場合がある。食品廃棄物、下水汚泥、製材工場等残材、農作物非食用部も堆肥化資源として利用されており、堆肥化は現状では最もポピュラーな利活用方法となっている。一方、バイオマスをエネルギー

原料として利用する場合、黒液、建設発生木材など直接燃焼される場合、林地残材、製材などの木くずを破砕、木粉を円柱状に成型した木質ペレットとし固形燃料としてそのまま熱利用する場合と発電に利用する場合(=バイオマス発電)、あるいはバイオマス（家畜排せつ物、下水汚泥、生ごみ等）を生物学的にメタン菌利用したメタン発酵を介してバイオガス（メタンと CO<sub>2</sub>が ほぼ 1 対 1 の混合ガス）に変え、メタンを燃焼、電気と熱を同時発生させて利用する場合がある。

#### [バイオマス発電]

バイオマス発電は、発電メカニズム自体は、火力発電と同じである。各地に存在するバ

バイオマス、例えば、おがくずのような産業廃棄物や食品廃材、汚泥など、これまで活用されていなかった領域からの資源の有効活用、エネルギーの地産地消、電源分散、風力発電や太陽光発電に比べれば電源として常時運転可能、カーボンニュートラル、持続可能性といったプラス側面の観点から評価され、国から固定価格買い取り制度 (FIT) や補助金制度の支援を受け、2021 年時点で日本に設置されたバイオマス発電所の数は 955 機、2014 年時点でのバイオマス発電量は 160 億 kWh に達している[17, 18]。Joule 単位に換算すると 57.6PJ となり、2020 年度の総エネルギー消費量(=12082PJ)の 0.48%を供している。

一方、マイナス側面からすれば、通常の化石燃料と比べれば、バイオマスは炭水化物の名が示すように水分を多く含み、直接燃焼方式でタービンを回転させて発電する際、火炎温度が上がらず、発電効率は 20%とされている[19,20]。発電効率 20%では、表 2 に示す純生産量 3 億 9 千万トンが全てセルロースと仮定し、植物体乾量 1g 当たり 4.2kcal との換算家庭値を用いてエネルギー値として 6840PJ に相当するとした計算からすると、表 4 に示す国内賦存量バイオマス量の総量 2 億 4000 万トン全てをバイオマス発電により電気エネルギーに変換した場合の発電量は、

$$6840 PJ \times \frac{24000}{39000} \times 0.2 = 842 PJ$$

と計算され、日本の総エネルギー需要量 12,082PJ の約 7%しか賅えないとの見積になる。

更に、バイオマスは化石燃料に比べて燃料としてエネルギー密度が低いことに加え

て、広く薄く分布しており、燃料調達のために収集運搬にかかる輸送コストが大きい。このためか、2022 年時点で実質的にバイオマス発電は、安価な国外からの輸入木質ペレットを使用した発電が大半を占めるとされ、廃棄物有効利用という性格は失われ、化石燃料に頼る火力発電と変わらないと指摘されている[18]。木質ペレットは、持続可能性の担保された森林から供給されるのが本来であるが、その管理システムは存在しているが、ほぼ機能しておらず、木質ペレットを製造するために輸入先の国での森林破壊を加速しているという[18]。バイオマスが蓄積している膨大なエネルギーを活用するためには、バイオマスは、エネルギー密度が低く、広く、薄く分布しているという特性に焦点を当て、これらを克服することに知恵を絞ったうえでの事業展開がなされるべきであろう。

### [バイオマスタウン構想に対する評価]

バイオマスタウン構想事業発足 8 年後の 2010 年度に総務省行政評価局がそれまでのバイオマス・ニッポン総合戦略に関連し、実施されている事業を審査した[21]。報告では、1)効果が発現しているものは 214 事業中の 35 事業(16.4%)、これらについても国の補助により整備された施設の稼働が低調なものが多いなど期待されている効果が発現しているものは皆無、2)バイオマスタウン構想に掲げる取り組み(785 項目)のうち、構想通りに実施されているのは 277 項目(35.3%)、3)バイオマス関連施設について CO<sub>2</sub> 収支を把握しているものは 132 施設中 3 施設(2.3%)、CO<sub>2</sub> 収支など 4 項目の CO<sub>2</sub> 削減効果について、全ての項目において効果が発現しているものは 77 施設中、わずか

8施設(10.4%)等の厳しい評価が公表されている[21]。

バイオマス・ニッポン総合戦略は、その策定の背景として再生不可能な化石資源の枯渇を見据え、再生可能なバイオマスを代替資源としてエネルギーやプラスチック等の化学工業製品の原料として、利活用する道を開くことを謳っている[14]。地球温暖化の防止、即ち温室効果ガス、“CO<sub>2</sub>”の削減は、戦略の最初に掲げられている目標であり、見方を変えれば、バイオマスのエネルギー資源としての活用であるが、事業審査はこの目標がほとんど進んでいないことを指摘している[14,17]。

堆肥製造はバイオマスタウン構想において現在、最も一般的に進められているバイオマス有効利用事業である。堆肥は農地に還元された後、炭水化物成分は自然分解、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oに戻り、バイオマスが地中から吸収した窒素、リン、カリ等の栄養成分は循環利用されるが、CO<sub>2</sub>排出量削減にはつながらない。収集、輸送を含めた堆肥生産過程で化石資源を使用する結果、堆肥を製造しない場合よりも多くの温室効果ガスを排出することになるとするモデル計算の結果も示されている[22]。

黒液、建設発生木材などバイオマスを直

接、あるいは破碎、木粉を経て木質ペレットに加工、固形燃料とし、化石資源に代わるエネルギー原料として利用する場合、CO<sub>2</sub>排出量削減に貢献するが、熱発生と熱利用の場所が近接する必要がある。一方、バイオマスをメタン発酵によりバイオガスに変え活用する事業も実施されている。メタンは、貯めることが出来、必要に応じて燃焼させて電気と熱を同時発生させての利用が可能以上に、バイオガス中に含まれるCO<sub>2</sub>を除去し、アップグレードしたバイオメタンは、そのまま都市ガス配管ラインに混入、天然ガス自動車の燃料にも使えるなど、汎用性に富み、バイオマス・ニッポン総合戦略の目的により適っている。

### 2-3. 宮津市のバイオマスタウン構想

#### 「みやづビジョン2011」

宮津市は、天橋立の在ることで知られる観光都市である。2010年時点での人口は、19,948人であるが、1955年に比べて16,252人、約45%も減少、高齢化、若者を中心に人口流出が進んでいる。市内面積の79%は森林で覆われ、竹1,100万本が生えている。その宮津市が、2011年に「みやづビジョン2011」と称する自立循環型経済社会構造への転換を謳うバイオマスタウン構想プロジェクトをスタートさせている[23]。

表5 宮津市バイオマスタウン構想 基本スキーム[23]

廃棄物系	廃食油	→	BDF	→	市有バス
	生ごみ・食品廃棄物	→	メタン発酵	→	発電
	し尿				熱
	浄化槽汚泥				液肥
未利用	木質	→	ペレット製造	→	ボイラー・ストーブ
	竹資源	→	破碎・ガス化	→	発電・メタノール製造

系				
---	--	--	--	--

プロジェクトは、宮津市に眠る自然環境中の資源を掘り起こし、利活用することにより、都市部に流れる「ひと、もの、かね」を地域内での循環に変え、経済的利益を獲得、これにより地域の活性化、定住の促進、同時にCO<sub>2</sub>削減に努めることを目的とする画期的な挑戦である[23]。

宮津市の掲げるバイオマスタウン構想の基本スキームを簡略化したものを表5に示す。廃棄物系では、廃食油を集めて、BDFとし、市が所有するバスの動力源に充て、また一般廃棄物の生ごみ、食品廃棄物、し尿、浄化槽汚泥を有機資源として捉え、メタン発酵を通じて、バイオガスとし、発電や熱利用、更にはメタン発酵消化液を有機質肥料として農地に還元、出来た作物を地産地消する社会システム構築が進められている。メタン発酵消化液が農業用に利用できるかの確認のためメタン発酵消化液を散布して生育した水稻と、化学肥料を施肥した圃場での違いを比較する試験も実施されている。1年目の結果として、収量は慣行栽培のものより良好であるが、食味は若干劣り、施肥方法に課題の在ること等が報告されている[23]。未利用系では、市の約8割を占める森林からの木質資源を、破砕ペレット化し、ボイラー・ストーブに燃料として使い、これにより化石資源使用を削減する。更に、世界初といわれているのが、1,100万本が生えている竹資源の液体燃料(メタノール)化と、ガス化発電である。生成バイオメタノールは、軽油代替燃料としての有効活用、実用化すると報告されている[23]。

「みやづビジョン 2011」は、2010年度の

総務省行政評価局のバイオマス・ニッポン総合戦略に対する事業審査の翌年に提案され、バイオマスは全て、化石資源に代替するエネルギー資源、もしくは、液肥、メタノールの製造原料として利活用するルートが作られており、堆肥製造は盛り込まれていない。「みやづビジョン 2011」は、CO<sub>2</sub>排出量削減に寄与しており、この意味で化石資源枯渇時代を見据えたバイオマス・ニッポン総合戦略の目的に適っている。

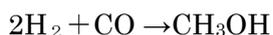
#### 【竹資源からのメタノール製造】

メタノールは有機化学工業の重要基幹物質の一つであり、現在は、天然ガス、重質油、石炭等の化石資源の水蒸気改質によって作られる合成ガス(CO+H<sub>2</sub>)からCu/Zn系触媒を用いて作られている。市内に生える竹からメタノールを製造する宮津市の試みは化石資源枯渇時代の先駆けと言えよう。竹は、特に幼年期、成長(=大気中のCO<sub>2</sub>分離固定化)が速やかで、メタノールを介した化学製品に変換すれば、その分カーボンネガティブに働く。

市の担当者による竹からのメタノール製造ルートの概要を以下に記す[24-26]。製造は2段階からなり、第1段階は坂井による農林バイオマス3号機を用いた浮遊・外熱式高カロリーガス化法と呼ばれる技法を用いる。この技法では、外部から800~1,000°Cに加熱した反応管内で、粉碎(3mm以下)した竹チップ等バイオマス粉と水蒸気を、触媒を使わず、常圧でガス化反応(水蒸気改質)させる。酸素・空気をガス化剤として使わず、完全な水蒸気雰囲気でのガス化反応で、原料バイオマス粉の有機成分はほぼ全量が高

カロリーガス燃料に変換される[26]。ガス組成は H<sub>2</sub>(40-50%),CO (20-30%), CH<sub>4</sub> (7-15%), C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (1-2%), CO<sub>2</sub> (10-20%)であり、主成分を構成している H<sub>2</sub> と CO が 70%を超え、50kW のガスエンジンやマイクロガスタービンを用いた高効率な発電およびコ・ジェネレーション(熱電併給)設備への燃料ガスとして、また C<sub>1</sub>化学体系での原料となる合成ガスとして利用されている。

「みやづビジョン 2011」では、水蒸気改質反応により生成されたガスは H<sub>2</sub> が CO のほぼ2倍含まれていることから、第2段階において小規模装置として有効な低圧多段抽出式メタノール合成法を用いて、数 10l/d ~数 kl/d の小規模プラントでメタノールが合成されている。天然ガスを原料とする実用技術での合成圧力が 10MPa であるのに対し、低圧多段抽出式メタノール合成装置では、外熱式高カロリーガス化装置から供される水蒸気改質による合成ガスは、1.5~2MPa に加圧、Cu/Zn 系触媒を含む合成触媒塔に送られ、200~250°Cの温度条件化、



の反応によってメタノールに変換される。ガス状メタノールは、60°C以下に冷却することによって液体メタノールとなることを利用し、この装置では CO, H<sub>2</sub> を含む合成ガスを触媒反応後、冷却、未反応の混合ガスと合成されたメタノールを気液分離し、未反応ガスのみを次の触媒反応塔に送ることを5回繰り返す。5段抽出によるメタノール転換率を従来法(中間抽出無し一段抽出に相当)と比較すると、合成圧力 1MPa では約4倍、1.5MPa では約6倍に達し、平衡転換率を大きく上回る転換率が得られている。

メタノールはホルムアルデヒドの製造原

料が主用途であるが、坂井等は用途として、メタノール車のエンジン燃料、バイオディーゼル用メチルエステル化剤、DMFC、家庭用アルコール燃料、アルコール固形化燃料、化学薬品、ガスタービン、ボイラー用燃料など主として燃料用としての利用を想定している[25]。

外熱式高カロリーガス化法では、竹チップに限らず、間伐材、おが屑、バーク、稲ワラ、ソルガム(=コーリヤン)などの草本類・木本類のほとんどが水蒸気改質反応の原料として利用でき、ガス化の反応に使用されるバイオマス量(31kg/h)と反応管外熱のために空気燃焼されるバイオマス量(20kg/h)との比は 3:2 の割合であると報告されている[25]。

日本は現在メタノールの全量を輸入で賄っており、年間の消費量は 183 万トン(平成 13 年度)となっている[27]。日本で消費するメタノールをみやづビジョン 2011 方式で生産するとした場合に必要なバイオマス量はどれくらいになるのだろうか?

バイオマス 1 トンを農林バイオマス 3 号機につぎ込んだ場合、600kg がガス化原料に用いられ、坂井によると、供給バイオマスの有機成分は水蒸気改質反応によりほぼ全量ガス化する。生成される C(炭素)を含む気体(CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, etc.)のうち、CO は 40Vol%を占める。次いで小規模多段式メタノール合成装置に送られた CO のうち、メタノールに転換する割合は坂井の示すところによれば 2MPa, 5 段抽出の条件では 70%達成可能とある[25]。バイオマスは全てセルロース(C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub> からなると仮定すれば、量論的には CO の 70%がメタノールに転換する場合、生成メタノール重量は

187kg と計算される。

バイオマス 1 トンから約 1/5 の重量のメタノールを作ることが出来るのであるから、日本国内のメタノールの年間消費量 183 万トンを賄うのに必要なバイオマス量は、その約 5 倍、9800 万トンと概算される。草本類・木本類のほとんどは水蒸気改質反応の原料として利用でき、表 4 に示される国内賦存バイオマス量、未利用系の林地残材や農作物非食用部の年間発生量は、これを上回る。

坂井は、再生可能エネルギーの中、量的に化石燃料に代わりえるものは水力発電、太陽光発電、風力発電、地熱発電、バイオマスに限られる。これらはバイオマスを除くと熱と電力の形態しかとりえない。これに対して、バイオマスはガス燃料、液体燃料、化学原料等へ変換できる唯一の再生可能物質であり、その意義は大きいと述べている [24]。

バイオマスは本質的な特性としてエネルギー密度が低く、広く・薄く分布している、従って収集・運搬に手間とコストがかかることは、避けられないことを考慮すれば、小規模プラントを用いてバイオマスを水蒸気改質、高カロリーの混合ガスに変換、燃料としても、 $C_1$  化学対象の合成ガスとしてメタノールに変換、適宜需要に応じる宮津市の試みは、未来技術として、他地域にも広がっていくことが期待される。

### 3. リグニン（黒液）

表 4 によれば、廃棄物系バイオマスの黒液（リグニン）は現在、パルプ・製紙工程に熱源として 100% 利用されている。この稿執筆にあたって、有機化学工業原料としてのバイオマスとして思いを強くしたリグニンについて書き加えたい。

#### [リグニンと高等植物の木質化]

リグニンとは、高等植物の木質化に関与する三次元網目構造を有する巨大フェノール性生体高分子であり、木材から紙パルプを作ることは木材からリグニンを可溶化等により除去する作業と説明されている [28]。図 1 にその構造推定図を示す [28]。

リグニンは一つ一つの芳香環に  $-OH$  基と  $-OCH_3$  基（水酸基）が結合したものが、主に炭素数 3 の直鎖構造、且つ酸素を含む炭化水素により互いに連結された構造となっている。リグニンは、植物の光合成（一次代謝）により同化された炭素化合物（グルコース）が、導管、繊維などの組織において更なる代謝（二次代謝）を受けることにより生産され、ヘミセルロースと同じくセルロースミクロフィブリルに付着、細胞間層に沈着、木質を形成してゆく。リグニンは、木材中の 20%~30% を占める。

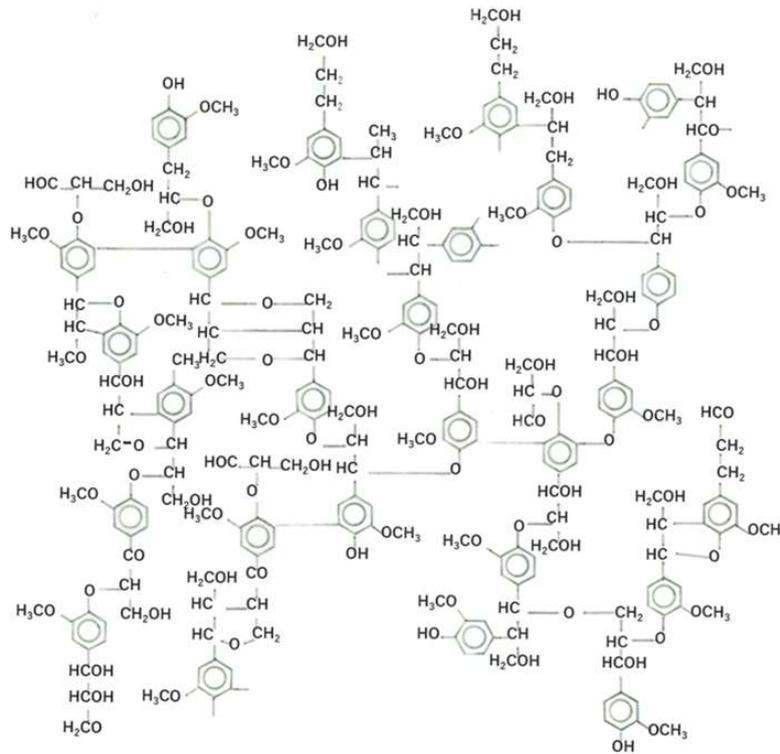


図1 リグニンの構造モデル[28]

**【石炭の生成とリグニン、白色腐朽菌】**

代表的な化石資源である石炭の起源はリグニンであるとの説がある[28]。地球史で、今から4億4300万年から4億1900万年前のシルル紀には、成層圏にオゾン層が形成され、これがさまざまな生物の陸上への進出を可能とし、その後期にはそれ以前のオルドビス紀に上陸していた植物にリグニンを合成するものが登場したとされている。植

物が立ち上がるためにはセルロース、ヘミセルロースを固めるためのリグニンが必要であった。しかし、その当時はリグニンを分解できる微生物はいなかったので、リグニンを合成した植物は腐りにくいまま地表に蓄えられていき、これが石炭へと変化していったという[28]。図2に石炭の構造推定図を示す。

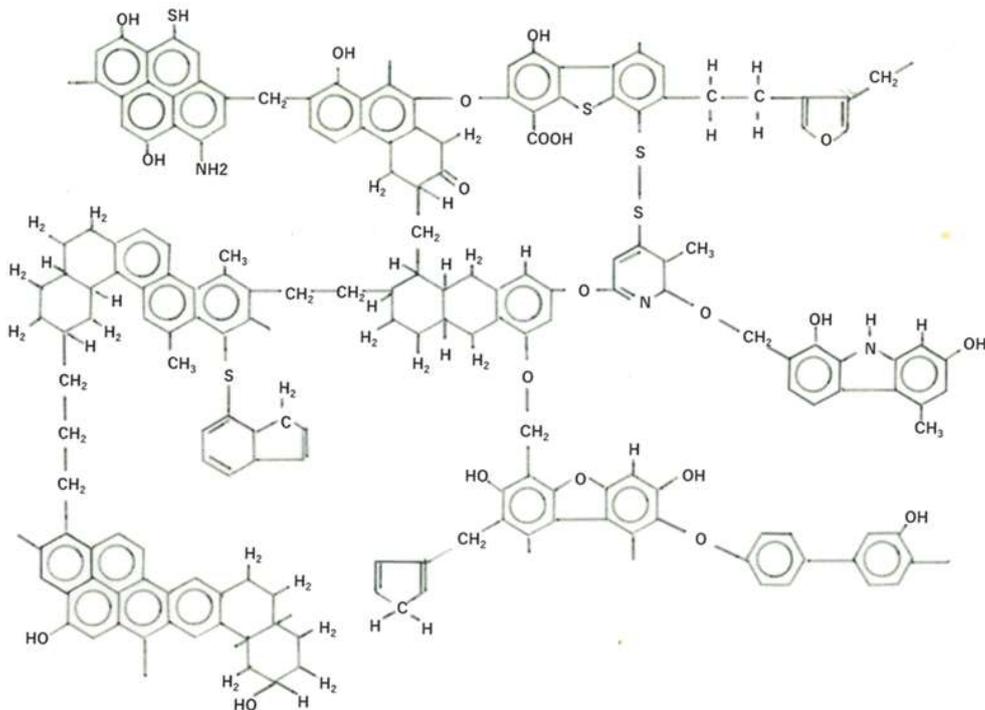


図 2 石炭構造推定図[29]

石炭は、芳香環が連結、多環となったものが直鎖構造の炭化水素により互いに連結された構造であり、殆どの芳香環に-OH 基が付いている一方で、-OCH<sub>3</sub> 基に代わって-CH<sub>3</sub> 基が付いており、石炭はリグニンに比べ脱酸素化が進んでいることがわかる。

白色腐朽菌は、地球上で唯一木材を完全分解できる生物で、リグニン分解能を獲得したのは古生代の石炭紀末期頃（2 億 9 千万年前）であると推定されている。石炭紀からペルム紀にかけて起こった有機炭素貯蔵量の急激な減少は白色腐朽菌のリグニン分解能力の獲得による結果と考えられている [28]。大気中の CO<sub>2</sub> 濃度増加を招いている石炭の代替として木材中に 20~30% も含

まれているリグニンを原料に用いて、有機化学工業における基幹物質 BTX（=ベンゼン、トルエン、キシレン）を取り出すことは出来ないであろうか？構造的に石炭よりもリグニンのほうが芳香環を取り出しやすいとは誰も考えるところであろう。実際、このような研究動機に基づいて、多くの研究が積み重ねられ、図 1 の構造モデルはリグニンの構造と結合に関わるこれまでの研究成果がまとめられていると言えよう。

高野によれば、リグニンはモノリグノールと呼ばれる基本骨格がフェニルプロパン単位（C<sub>6</sub>-C<sub>3</sub> 単位）からなるリグニンモノマーが酵素により酸化ラジカル重合し、3 次

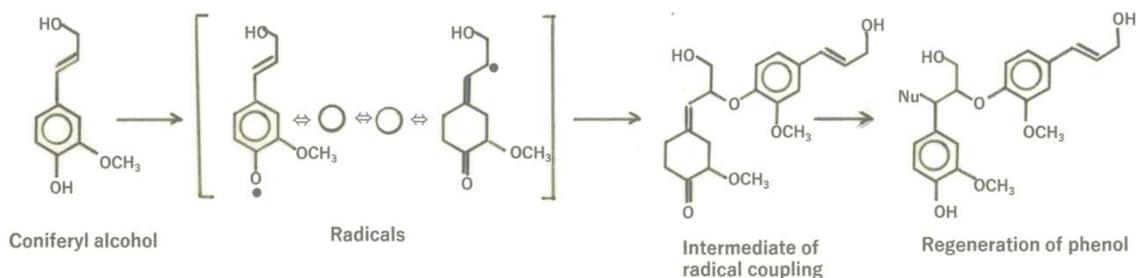


図3 モノリグノール（コニフェリルアルコール）のラジカル重合反応

元ネットワークを形成している高分子化合物とある[30]。図3は、リグニンモノマーの一種コニフェリルアルコールのフェノール性水酸基から水素ラジカルが引き抜かれ、フェノキシラジカル種、及びいくつかの共鳴体が生成、ラジカルカップリングを起こし、生成中間体種が求核種（別のリグニンモノマー、セルロース、ヘミセルロース等）の攻撃を受け、**B-O-4**と称される新たなエーテル結合を作りフェノール性水酸基が再生する過程を示す。再生したフェノール性水酸基は、このプロセスを繰り返すことにより高分子化が進み、3次元構造のリグニンが形成される[30]。

図1より、リグニンの結合様式には、(1) エーテル結合と縮合型炭素-炭素結合の2種類があり、(2) **B-O-4**結合が主要結合であることが分かる。リグニンは、モノマーレベルでは比較的単純な化合物であり、リグニンの形成機構に関する理解も進んでいるが(図3)、ポリマーレベルでは非常に複雑な化合物である[30]。

#### [工業リグニン（単離リグニン）]

リグニンから有機化学工業の基幹物質ベンゼン、トルエン、キシレンを取り出すためには、木材の20~30%を占めるとされるリグニンを木材から取り出す必要がある。単

離リグニンは、工業リグニンとも呼ばれ、紙パルプ製造プロセスにおける木材からのセルロース・ヘミセルロースの分離工程の副生成物として得られている。最も重要な工業リグニンとして、リグノスルホン酸は年間約100万トン、クラフトリグニンは年間約10万トン弱、それぞれ生産されているが、両者の生産量は紙パルプ業界で使用可能なリグニンの約2%に過ぎないと推測されている。クラフトリグニンは、クラフト法と呼ばれる化学パルプ化法（水酸化ナトリウム/硫化ナトリウムなどによる高温高压反応）由来のリグニンであり、この方法では黒液と呼ばれる廃液からパルプ化薬品の回収が可能である、薬品回収工程で有機物（=リグニン主体）の燃焼によるエネルギー回収が可能である点から経済性に優れ、現在化学パルプ化法の主流であり、現在のリグニンの最大の利用用途である。クラフトリグニンは現在の使用量は少ないものの、その量的ポテンシャルは表4に示すように約1400万トンと非常に高いことに留意する必要がある[30]。

木材からセルロース/ヘミセルロースを分離し、工業リグニンを得る脱リグニン反応では、リグニンの分解反応（=エーテル結合の切断）・低分子化反応が主な反応である

一方、再縮合反応を伴うことも知られている。従って、工業リグニンは、その製造過程において、分解反応、再縮合反応の両者に由来する化学変性を著しく受けており、その化学構造は天然リグニン以上に複雑なものとなっている[30]。

### [リグニンからの BTX 製造]

複雑な化学構造を有するリグニンから、有機化学工業の原料となる低分子化合物を得るためには、個々のリグニンモノマーを結び付け、3次元構造の高分子化を作り上げている、エーテル結合と炭素-炭素結合の2種類の結合を切る必要がある(図1)。各種のエーテル結合の結合解離エンタルピーは、概して炭素-炭素結合のそれ等よりも小さく、熱分解により開裂するが、縮合型 C-C 結合の開裂には触媒を用いた接触水素化が必要とされている[31]。

極端な条件、例えば、250~260°C及び、220~240 気圧の下での接触水素化分解ではリグニンが分解され、飽和シクロアルカンまで水素化されるとの報告がある[31]。最近、リグニンのより温和な条件下(150~200°C)での接触水素化分解で、芳香環の水素化を避け、且つジヒドロコニフェリルアルコールやジヒドロシナピルアルコールを選択的に得られることが示された。広葉樹リグニンをを用いた場合ではモノマー収率は50 wt%程度であるが、針葉樹リグニンでは30wt%に満たない。これは、針葉樹リグニンは、3次元構造において、モノマー同士がエーテル結合より強固な C-C 結合によりつながっているためであり、解重合のためにはより高温条件、例えば 250~350°Cでの水素化分解を行う必要がある[31]。しかし、この温度条件下では、熱分解生成物のコ

ニフェリルアルコール等のモノマーのフェノール性水酸基のプロトン移動が起こり、キノンメタイドに変化、これが再重合反応の活性な中間種として作用し、再重合反応が進行する結果、主生成物はコニフェリルアルコールよりも分子量の大きい化合物となる[31]。

最近、河本らは、プロトン移動に引き続く再重合反応は、1)非プロトン性溶媒中でプロトンの移動を抑制、2)コニフェリルアルコールの二重結合を水素化し飽和アルキル化することにより抑止可能であることを見出した[31,32]。河本らは、熱分解支援接触水素化法と名付けた手法により、杉(針葉樹)から分離した粉碎木質リグニン及び organosolv リグニンを H<sub>2</sub>と Pd/C 触媒を添加したアニソール溶媒中、250~350°Cの高温領域で接触水素化分解を行い、元のリグニン中における芳香環量ベースでそれぞれ、62 及び 43.5 mol%という大変高いモノマー収率を達成出来たことを報告している[31,32]。主生成モノマーは、グアイアコール、メチルグアイアコール、及びエチルグアイアコールで、図4は彼らの提案する反応経路を示す[32]。リグニンの3次元構造の大部分を作り上げているエーテル結合が非プロトン性のアニソール溶媒中での熱分解により開裂、コニフェリルアルコールやそのオリゴマーが生成する。次いで、Pd/C 触媒と H<sub>2</sub>存在下、コニフェリルアルコールの二重結合が水素化され、ジヒドロコニフェリルアルコールが生成、重合反応が抑止される。一方、水素化は、各種の縮合型 C-C 結合の開裂、更には側鎖プロピル基の C-C 結合の開裂に及ぶが、主要生成物であるアルキルグアイアコール類の芳香環の水素化

には進まない[31,32]。得られる芳香族モノマーの沸点は低く、更なる分留、接触水素化を加えることにより、BTX 製造の道は開か

れることが期待されている[32]。

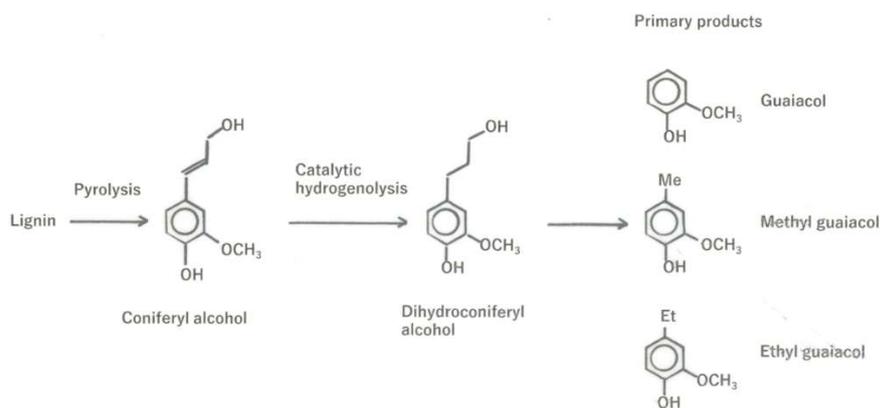


図4 熱分解支援接触水素化分解によるリグニンからの低級芳香族モノマーの生成経路

統計によれば、2021 年末での主要石油化学製品メーカーの合計のベンゼン、トルエン、キシレンの生産能力は、それぞれ、約 500, 210, 及び 830 万トンであり、実際の生産量はその 60~70%の 324, 150, 500 万トンと報告されている[33]。BTX 全部での生産量は、974 万トンであり、表 4 に示す黒液の量は 1400 万トンとはるかに大きいことを付記する。

#### 謝辞

ここに、この稿執筆のきっかけとなる資料を提供くださった元国会議員吉井英勝氏、国立国会図書館の小山瑞樹氏、山口聡氏に

それぞれ厚くお礼申し上げます。

#### 引用文献

[1] 湯川泰英、向山光昭監訳 パイン有機化学[II] 第5版 廣川書店 平成7年9月25日 p.794

[2] 杉浦美羽 伊藤繫 南後守 光合成のエネルギー変換と物質変換—人口光合成をめざして— DOJIN BIOSCIENCE SERIES 19 化学同人 (2015) 1. 光合成の全体像 園池公毅 2-10.

[3] [www.sc.fukuoka-u.ac.jp/~bc-1/Biochem/general.htm](http://www.sc.fukuoka-u.ac.jp/~bc-1/Biochem/general.htm), 代謝総論 異化と同化

[4] <https://hideyuki-komiyama.com/2020/06/07/saiboukokyuu-tokougousei/>生物の特徴 細胞呼吸と光合成

[5] 改訂新太陽エネルギー利用ハンドブック 日本太陽エネルギー学会編 2015年 p.291-297 第9章 生物環境と太陽エネルギー利用.

[6] 岩城英夫 「わが国におけるファイトマス資源の地域的分布について」 環境情報科学 10巻2号 1981,5 p.54-61

[7] 吉良竜夫 陸上生態系概論 p.119 共立出版

[8] 平均植物乾量 1g 当たりの熱量を平均

4.15kcal との仮定について

セルロース(C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)1 モルは 162 g、従ってその熱量を kJ に換算すると、

$$162 \times 4.15 \times 4.2 = 2824 \text{ kJ}$$

となり、光合成作用でブドウ糖が出来る際に太陽から吸収する自由エネルギー(=2870kJ/mol)にほぼ等しい。

[9] <https://www.ene100.jp/zumen/1-2-1> 原子力・エネルギー図面集 1-2-1 エネルギーの使われ方 資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」

[10] <https://www.ene100.jp/zemen/2-1-11> 原子力・エネルギー図面集 部門別 CO<sub>2</sub>排出量の推移 資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」

[11] 森林と気候変動 カーボンニュートラルと森林木材利用による気候変動の緩和へ向けて 基礎資料集 公益財団法人 国土緑化推進機構 2022 section 2 気候変動を緩和する森林の仕組み

[12] “エリアンサス”のクローン増殖技術の開発—新しいエネルギー資源作物の研究—九州沖縄農研ニュース No.43 2013

[13] ”エリアンサスは乾物生産性が高くセルロース系資源作物として有望である”農研機構

<https://www.naro.go.jp/project/results/laboratory/karc/2008/biomass08-03.html>

[14]

[<https://www.maff.go.jp/j/Shokusan/biomass/attach/pdf/biojapan-4.pdf>] バイオマス・ニッポン総合戦略 平成18年3月31日閣議決定

[15] 惣田昱夫、「世界初のバイオマス村ドイツ・ユンデを訪ねて」、ブイツーソリューション p.66

[16]

<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b-sangyo-toshi/attach/pdf/b-sangyo-toshi-13.pdf> バイオマスタウン構想策定マニュアル

[17] 保坂稔、「ドイツバイオエネルギー村の特色に関する検討—日本のバイオマスタウン構想との比較から—」、長崎大学総合環境研究 第21巻第1号 pp. 22-30 2018年12月

[18] <https://www.wikipedia.org/wiki/> バイオマス発電

[19] <https://rakuene-shop.jp/columns/262/#:~:text=発電効率を比較> バイオマス発電

[20] 佐野寛 バイオマス燃焼 Biomass Combustion 高温学会誌 33(2007)3-8.

[21]

[[https://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/39714.html](https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/39714.html)] バイオマスの利活用に関する政策評価<評価結果及び勧告>

[22] 森本英嗣 バイオマス利活用による経済性と環境影響の評価—バイオマス総合利活用評価モデル—農村計画学会監修 農村計画学のフロティア 2 農林統計出版 2014年

[23] 村田武・渡邊信夫、「脱原発・再生可能エネルギーとふるさと再生」第3章 宮津市の「バイオマスタウン構想」—自立循環型経済社会をめざした日本三景「天橋立」のある街宮津市の挑戦、筑波書房

[24] [https://www.naro.affrc.go.jp/org/nfri/yakudachi/biofuel/pdf/091207\\_22sakai.pdf](https://www.naro.affrc.go.jp/org/nfri/yakudachi/biofuel/pdf/091207_22sakai.pdf) 坂井正康 「農林バイオマス3号機によるガス化発電・アルコール変換技術」

[25]

[https://www.affrc.maff.go.jp/docs/gikai/pdf/n2\\_siryoul.pdf](https://www.affrc.maff.go.jp/docs/gikai/pdf/n2_siryoul.pdf) 農林水産省技術会議殿  
説明「農林バイオマス3号機」の基本技術  
バイオマスのガス化と液体燃料合成 2008  
年5月20日 坂井正康  
[26]

[http://kinkiagri.or.jp/activity/Sympo/sympo50\(100315\)/2sakai.pdf](http://kinkiagri.or.jp/activity/Sympo/sympo50(100315)/2sakai.pdf) 2. 草木バイオ  
マスの浮遊外熱式ガス化と液体燃料合成  
実証プラント「農林バイオマス3号機」の成  
果 坂井正康  
[27]

<https://www.levo.or.jp/lib/naruhodo09.html>  
一般財団法人 環境優良車普及機構  
なるほど! ザ・ワードから低公害車用語解  
説 第9回 メタノール

[28] <https://ja.wikipedia.org/wiki/リグニン>

[29] 持田勲、藤津博 触媒講座第9巻(工  
業触媒反応編3)工業触媒反応 II 5 石  
炭液化、触媒学会 1985

[30] 高野俊幸 「リグニンの利用に向けて」

ネットワークポリマー 31(5)(2010)213-  
223

[31] J. Wang, E. Minami, H. Kawamoto,  
“Pyrolysis-assisted catalytic  
hydrogenolysis of softwood lignin at high  
temperatures for the high yield  
production of monomers” 「高収率モノマ  
ー製造を目的とする高温領域での針葉樹リ  
グニンの熱分解に補助された接触水素化分  
解反応」 *Green Chemistry* **25** (2023)2583-  
2595.

[32] [https://shingi.jst.go.jp/pdf/2023/2023\\_mirai\\_002.pdf](https://shingi.jst.go.jp/pdf/2023/2023_mirai_002.pdf) 河本晴雄、「リグニンからのモ  
ノマー製造による化学工業原料への展開」  
新技術説明会、2023年5月12日

[33] <https://www.jpca.or.jp/trends/manufacturer.html> 石油化学工業協会

e-mail [iizuka-fujino@nifty.com](mailto:iizuka-fujino@nifty.com)