

# 未利用バイオマスのマテリアル化／ エネルギー化と技術競合回避による効率的利活用

山口大学 教授 合田 公一

## 1. 調査研究の背景と目的

本調査研究は、未利用バイオマスの新たな利活用に向けて、パーム油生産後に大量に発生するアブラヤシ残渣に着目し、そのマテリアル化およびエネルギー化に関わる環境負荷評価を実施する。両者の開発はこれまで独自に行われてきたが、技術競合を避けるため、EFB (Empty Fruit Bunches の略記) から製造されるマテリアル／エネルギー製品の製造・使用・廃棄段階で排出される CO<sub>2</sub> 量を文献データに基づいて解析し、確率過程モデルを用いて両者の各段階における CO<sub>2</sub> 排出量を時系列表現で比較した。最終的に、環境負荷を低減するための EFB の利活用について基本概念となる考えを提唱した。

## 2. 調査研究の実施体制および方法

**2-1 実施体制** 共同研究者として、山口大学研究推進体「未利用バイオマス『竹』からの燃料化および固体材料化を目指した先端要素技術の開発とバイオマスコンビナート設立への基盤技術開発」のメンバー4名を充てた。また、EFBを大量に排出するマレーシアにおいて、バイオマスの機械的性質および熱的性質について幅広い知見と研究能力を有する2名を加え、計6名を共同研究者とした。さらに、LCA (Life Cycle Assessment) を専門職とする1名がアドバイザーとして委員会メンバーに加わった。

**2-2 実施方法** ここではパーム油の生産を一次製品とみなし、残渣である EFB からのマテリアル化／エネルギー化を二次製品とした。二次製品化にともなう環境負荷を論じた文献を調査し、それぞれの CO<sub>2</sub> 排出量を抜粋して各種別で整理した。マテリアル化の例としては、炭素材料および CNF 材料 (CNF: Cellulose nanofiber) を取り上げた。またエネルギー化の例として、ペレット固形燃料および炭素固形燃料を取り上げた。

実施方法については、各メンバーから該当すると思われる文献を選びだし、随時アップロードしてメンバー間で情報共有した。メンバー間で協議するとともに、最終的にアドバイザーがよりの確かな論文をピックアップした。ここでは、Google scholar や Scopus による文献情報システム、および委員会メンバーが過去に調査した CO<sub>2</sub> 排出量に関する文献を通して該当文献を選別した。以上から、成果報告書に記載の 11 文献を調査対象とした。

以上の文献データから各製品の CO<sub>2</sub> 量を推測するとともに、確率過程としてマルコフ過程を用い、製造・使用・廃棄段階の各占有率の時間変化を計算した。得られた CO<sub>2</sub> 排出量は各占有率の積分値に相当すると仮定し、製造・使用・廃棄に要するサイクル期間を予測した。

## 3. 調査研究の結果および考察

**3-1 CO<sub>2</sub> 排出量の算定** 評価範囲は、パーム栽培からパーム油抽出後に残る EFB を取り上げ、これから4種類の二次製品、すなわち、ペレット固形燃料、炭素固形燃料、炭素材料、CNF 材料の製造、さらに、これらの二次製品の使用・廃棄までを対象とした。

EFB はパーム油抽出後に残る廃棄物であるが、本報告では有価物とみなし、パーム油抽出までに発生した環境負荷をマスアロケーションした。また、CO<sub>2</sub>はパーム栽培時に固定化されると仮定し差し引いた。二次製品の製造・使用・廃棄段階では、燃焼時に排出されるCO<sub>2</sub>をプラス要因としてカウントした。加えて、EFBの利用は廃棄物の有効利用であるため、その結果生じる用途は代替材料の影響を控除できると仮定した。

続いて、EFB から製造される上記4種類の二次製品について、CO<sub>2</sub>排出量をそれぞれ評価した。ペレット固形燃料と炭素固形燃料は、使用段階において燃焼し、CO<sub>2</sub>を排出する。しかし、同等の石油由来エネルギーを代替したと仮定し、同等のCO<sub>2</sub>排出量を差し引いた。炭素材料の使用段階では、石油由来の活性炭で代替することを想定した。また、CNF材料はポリプロピレン (Polypropylene, PP と略記) と複合化することで、同じ体積と強度でPPを代替できるものと想定した。炭素材料、CNF材料は使用段階ではCO<sub>2</sub>は排出せず、廃棄段階で燃焼によるCO<sub>2</sub>排出を想定した。

以上のようにして算出したCO<sub>2</sub>排出量を表1に示す。ここで、DeductionとはEFBを用いることで石油製品から回避できるCO<sub>2</sub>排出量のマイナス相当分を意味する。これから、CO<sub>2</sub>排出量はペレット固形燃料が最も少なく、続いて、炭素固形燃料、炭素材料、CNF材料の順に多くなることが見出された。回避できるCO<sub>2</sub>排出量を考慮するならば、炭素材料が最も優れていることがわかる。

表1 二次製品の製造・使用・廃棄時における温暖化ガス排出量分析 (単位: kg-CO<sub>2</sub>e/kg)

	Pellet solid fuel	Carbon solid fuel	Carbon material	CNF material (50%)	CNF material (20%)
EFB production	0.10	0.19	0.19	0.05	0.02
EFB CO <sub>2</sub> absorption	-1.73	-3.35	-3.35	-0.84	-0.34
Secondary products production	0.45	0.89	0.89	1.80	2.22
Total secondary products	-1.18	-2.27	-2.27	1.01	1.88
Application	1.68	3.19	—	—	—
Disposal	—	—	3.19	2.41	2.85
Total	0.49	0.92	0.92	3.42	4.73
Deduction	-1.22	-1.96	-8.6	-1.41	-2.02
Total including deduction	-0.73	-1.04	-7.68	2.01	2.71

3-2 マルコフ過程モデルによるCO<sub>2</sub>排出量のサイクル期間の検討 ここでは、EFB 残渣が得られた状態を初期状態とする。これを素材保管状態 S<sub>0</sub> (Raw material storage state) と呼ぶ。続

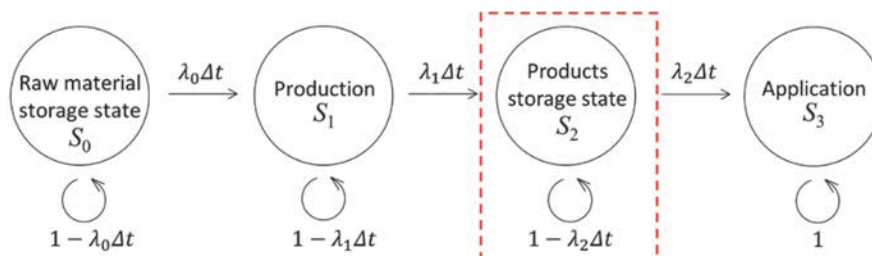
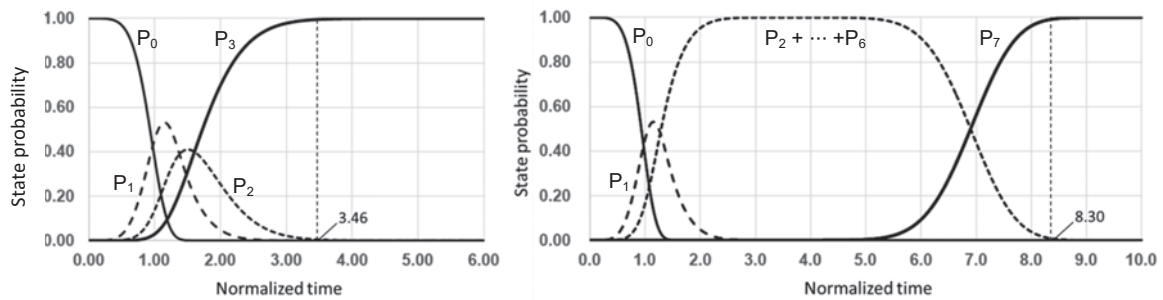


図1 素材保管状態→製造状態→製品保管状態→使用状態を表わすマルコフグラフ



(a)  $m_0 = 5.0, m_1 = 2.0, m_2 = 1.5,$   
 $k_0 = k_1 = k_2 = 1.0$

(b)  $m_0 = 5.0, m_1 = 2.0, k_0 = k_1 = 1.0,$   
 $m_2 = m_3 = \dots = m_6 = 4.8, k_2 = k_3 = \dots = k_6 = 5.0$

図2 (a)ペレット固形燃料および(b)炭素材料の基準化時間にとまう各状態の占有割合の変化

いて、これを製造する工程、製造状態  $S_1$  (Production state) を設ける。さらに破線枠で示す製品保管状態  $S_2$  (Raw material storage state) を設け、製造後に使用が同時に終了する不具合を解消する。その後を使用状態  $S_3$  (Application state) を設ける。図1にそのマルコフグラフを示す。

マルコフグラフから得られる差分方程式に基づいて各状態確率(全体の占有割合)を計算した。図2(a)にペレット固形燃料、図2(b)に炭素材料の計算結果をそれぞれ示す。パラメータ  $m_i, k_i$  はワイブルパラメータを示す。ここで、点線下方にある数字は、サイクル期間を示す。サイクル期間は製造時および使用(または廃棄)時における  $\text{CO}_2$  排出量を比較して比率を求める。例えば、ペレット固形燃料では表1から  $0.45 : 1.68$  なので、大まかではあるが、両者の比は  $1 : 4$  である。続いて、製造状態確率  $P_1$  の全積分値  $\int P_1 dt$  と使用状態確率  $P_2$  が1に達する時点での積分値  $\int P_2 dt$  の比が  $1 : 4$  になるようなワイブルパラメータを探索する。図2(a)に示すパラメータ設定のとき、 $t = 3.46$  で積分比4を示した。このとき、 $P_3 \approx 1.0$  を満足している。

炭素材料、CNF材料のサイクル期間において、使用状態は  $\text{CO}_2$  を排出しない区間であり、これが廃棄状態まで続くことを勘案した。換言すると、使用状態の占有率が100%の状態がある程度の期間続くことを考慮する必要があり、製品保管状態を複数状態として表現した。炭素材料は炭素固形燃料と同じく  $0.89 : 3.19$  なので、同様に  $1 : 3.5$  であり、積分比  $\int P_7 dt / \int P_1 dt = 3.5$  になるようなワイブルパラメータを探索した(ここでは、便宜上、製品保管状態を  $S_2 \sim S_6$  の5状態として解析した)。これから  $m_2 = 4.8$  に設定するとき、 $t = 8.30$  で積分比は3.5を示した。 $8.30 > 3.46$  であり、2.4倍程度である。これは、仮に同量のEFBがペレット固形燃料と炭素材料に使われるとすると、 $t = 8.30$  に達するまで前者は3回目のサイクルに入っているので、 $\text{CO}_2$  は結果的に  $0.49 \times 8.30 / 3.46 = 1.18 \text{ kg-CO}_2\text{e/kg}$  ほど排出されることになり、炭素材料の  $0.92 \text{ kg-CO}_2\text{e/kg}$  より多くなる。

以上をまとめると、ペレット固形燃料および炭素固形燃料ではすべて使用(廃棄)されるまでのサイクル期間が短く、一方で炭素材料およびCNF材料の廃棄に至るサイクル期間が長い。つまり、ペレット固形燃料のように、Totalでは  $\text{CO}_2$  排出量の少ない製品であっても、サイクル期間を考慮することで、単位重量当たりの  $\text{CO}_2$  排出量は必ずしも最小にはならない。実際の製造状態の分布を正確に調査し、定量的に考察することが今後の検討課題である。