Original Paper

Characterization of Inorganic Constituents in Oil Palm (*Elaeis guineensis*)
by SEM-EDXA

Yosuke TONO, Hisashi MIYAFUJI, Masashi SHIBATA, and Shiro SAKA

(Received March 12, 2007)

SEM-EDXA 法によるアブラヤシの無機成分分析

東野陽介, 宮藤久士, 芝田正志, 坂 志朗

Studied were inorganic constituents of the ash from various parts of oil palm (*Elaeis guineensis*) such as trunk, frond, mesocarp, endocarp (shell), kernel cake and empty fruit bunch (EFB) by scanning electron microscopy equipped with energy-dispersive X-ray analysis (SEM-EDXA). As a result, K, Si, Na, Ca, S, P and Mg were found as elements in all parts of the oil palm studied. Particularly, Si and K were abundant in the trunk, shell, mesocarp and kernel cake, while the frond and kernel cake contained, respectively, K, Ca and P in a large quantity. The elements of Cl, Fe and Al were, however, detected only in some parts.

There existed three types of shapes in the ash such as needle, sphere and fluffy substances in the oil palm. However, the needles were found only in the trunk with spheres. In some other parts such as frond, shell, kernel cake and EFB, fluffy and sphere substances were found in their ash, while in the mesocarp, only fluffy substances were observed. For the needles and spheres, elements of Na and Si were, respectively, found to be localized, whereas fluffy substances contained all of the elements such as K, Si, Na, Ca, S, P and Mg with sometime Cl, Fe and Al.

These elements found are important and prerequisite for the healthy growth of the oil palm. Therefore, it may be concluded that, upon the whole utilization of the oil palm, inorganic constituents found in this study must be returned to the plantation site. Otherwise, the same has to be compensated to its site for sustainable development.

Key Words

Oil palm, Trunk, Frond, Mesocarp, Endocarp, Shell, Kernel Cake, EFB, Ash, SEM-EDXA

1. 緒 言

化石資源の消費により排出される二酸化炭素の温室効果が主原因とされる温暖化は、地球規模でのエネルギー・環境問題としてその解決が急務となっている。一方、大気中の二酸化炭素と水を用いた光合成によって生合成されるバイオマスは、地球温暖化の抑制に寄与する環境負荷の小さい資源として、その利用に期待が寄せられている。中でも各種油脂資源から調製されるバイオディーゼルは自動車等の燃料として注目を集めており、すでに世界各地で実用化の段階にある。

バイオディーゼルの製造には様々な油脂原料が利用できるが、アブラヤシから得られるパーム油 (Palm Oil) やパーム核油 (Palm Kernel Oil) もその原料として有望視されており、マ

レーシア、インドネシアなどの東南アジアで、大規模なプランテーションが行われている。しかしながら、パーム油やパーム核油はアブラヤシの生鮮果房 (FFB: Fresh Fruit Bunch) の果実部から得られ、油糧成分の抽出過程において、空果房 (EFB: Empty Fruit Bunch)、中果皮 (Mesocarp)、内果皮 (Endocarp (Shell))、パーム核粕 (Kernel Cake) などの様々な廃バイオマスを生じる。さらに、プランテーション地においては、茎葉 (Frond) や伐採時に生じる幹 (Trunk) なども未利用のまま放置され、廃バイオマスとなっている。

これらのマレーシアにおける年間発生量は、EFBが1,340万 t, Mesocarpが700万 t, Shellが410万 t, Kernel Cakeが190万 t, Frondが110万 t, Trunkが500万 tと報告されている¹⁾。

一部は肥料や飼料,あるいは工場のボイラー用燃料として利用されているものの,ほとんどが未利用のまま廃棄されているのが現状である。したがって,パーム油やパーム核油のみならず,これらの廃バイオマスについても資源として活用し,アブラヤシの総合的有効利用を図ることが重要で,バイオマスの利用促進,廃棄物の低減といった観点から大変意義深いことである。

そこで,まずアブラヤシ各部位の化学成分組成をはじめとする基礎的なデータ²⁾を得るとともに,本論文では,エネルギー分散型X線分析装置を装備した走査型電子顕微鏡(SEM-EDXA)³⁾⁴⁾を用いてアブラヤシ中の無機成分について分析を行い,アブラヤシに存在する無機元素の基礎的な知見を得ることを目的とした。なお,この無機成分に対しては,コンクリート原料としての利用⁵⁾⁶⁾や大気・水質汚染物質の吸着剤^{7)~9)}としての応用的研究がなされているが,本研究で見られる基礎的な研究はほとんどなされていない。

2. 実験

2.1 試料

試料として,マレーシア産アブラヤシ(*Elaeis guineensis* Jacq.)を用いた。幹(Trunk),茎葉(Frond),中果皮(Mesocarp),内果皮(Endocarp)(本研究では,材料としての利用を検討するため,Endocarpの代わりに,以後Shell(果実殻)と表記する),核(Kernel)(本研究では,Kernelからパーム核油を搾り出した残渣を用いるため,Kernelの代わりに,以後Kernel Cake(パーム核粕)と表記する)および空果房(EFB: Empty Fruit Bunch)に当たる6部位を取り出した。これらをWiley型粉砕機(1029-C,吉田製作所製)を用いてφ0.5mm以下に粉砕し,エタノール:ベンゼン(1:2(v/v))(共に,ナカライテスク製,特級)混合溶媒により8時間のソックスレー抽出を行い,実験に供した。

2.2 灰分の調製

約1.0gの絶乾試料をろつぽに入れ,これをマッフル炉にて600℃で2時間加熱処理を行うことで灰分を得た。この時のろつぽ内の残渣重量を灰分量とし,加熱処理前の無抽出試料の絶乾重量をもとに灰分含量(wt%)を算出した。

2.3 走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型X線分析(SEM-EDXA分析)

試料台に貼り付けたカーボンテープの上に灰分試料を分散させ,蒸着処理を行うことなく,エネルギー分散型X線分析装置(EDAX社製Phoenix)を装備した走査型電子顕微鏡(日本電子製JSM-5800)を用い,加速電圧20kVにてSEM-EDXA分析を行った。特性X線のマッピングについては,Na-K α X線(0.99keV-1.08keV)およびSi-K α X線(1.68keV-1.79keV)を用いた。

3. 結果および考察

3.1 灰分

Table 1に,各試料の灰分含量を示す。Shellにおける1.0wt%からMesocarpにおける9.3wt%まで,アブラヤシの部位によって灰分含量が大きく異なることが分かる。また,灰分の色もFig. 1に示すように,Trunk, Kernel Cake, EFBでは茶褐色であるのに対し,Frondは白色,Shellは黒褐色, Mesocarpは赤褐色と様々であり,灰分を構成する元素の種類や組成が部位により異なることが示唆される。そこで,各試料中に含まれる元素を明らかにするためエネルギー分散型X線分析を行った。

3.2 SEM-EDXA分析

3.2.1 幹(Trunk)

Fig. 2には,Trunkから得られた灰分のSEM-EDXA分析の結果を示す。(a)のSEM写真より,浮遊状物(Fluffy; だ円内),針状(Needle; 長方形内),球状(Sphere; 円内)の形状の異なるものが含まれていることが分かる。

これらの物質を光学顕微鏡で観察したところ,偏向顕微鏡のクロスニコルのもと針状物は複屈折を示すことより,結晶体であること,一方球状物や浮遊状物は複屈折を示さず,非晶であることを確認した。佐伯ら¹⁰⁾の研究からも,針状のものは結晶体であると考えられる。

さて, Fig. 2(b)には, (a)の視野におけるEDXAスペクトルを示しており, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, KおよびCaが含まれていることが分かる。また, (c)には (a)の視野におけるNa-K α X線のマッピングを示しているが,球状物以外の部分でNaが存在していることが分かる。(d)には,針状結晶での

Table 1 Yield of the ash from various parts of the oil palm

Part	Ash content (wt%)
Trunk	4.1
Frond	5.7
Mesocarp	9.3
Shell	1.0
Kernel Cake	6.7
EFB	1.5

Fig. 1 The ash from 6 different parts of the oil palm

Fig. 2 SEM — EDXA on ash from the Trunk
(a) Scanning electron micrograph
(b) EDXA spectrum for (a)
(c) Distribution map of Na-K α X-rays for (a)
(d) EDXA spectrum for needle crystals
(e) Distribution map of Si-K α X-rays for (a)
(f) EDXA spectrum for sphere substances

EDXA分析の結果を示しており、特徴的な元素としてNaの強いピークが確認され、Naが針状結晶に局在しているものと考えられる。一方(e)には、(a)の視野でのSi-K α X線のマッピングを、(f)には、球状物でのEDXA分析の結果を示している。これらの結果より、球状物にはSiが局在しているものと考えられる。

3.2.2 茎葉 (Frond)

Fig. 3 には、Frond から得た灰分の SEM — EDXA 分析の結果を示す。(a)のSEM写真より、浮遊状物と球状物が灰分に含まれていることが分かる。(b)には、(a)の視野におけるEDXAスペクトルを示しており、Na, Mg, Si, P, S, Cl, KおよびCaの元素を含んでいることがわかる。また、(c)には(a)の視野でのSi-K α マッピングを示しており、球状物に主としてSiが集中していることが分かる。さらに、(d)のスペクトルは球状物からのものであるが、特徴的なSi-K α X線の強いピークが確認できる。これらの結果から、Trunkでの場合と同様、Siが球状物に局在していることがわかる。

3.2.3 中果皮 (Mesocarp)

Fig. 4 には、Mesocarp から得た灰分の SEM — EDXA 分析の結果を示す。(a)のSEM写真から、浮遊状物と球状物の形態が観察される。また、(b)に示すように、EDXA分析からは、Na, Mg, Al, Si, P, S, K, CaおよびFeなど多くの元素が検出されている。(c)に示しているSi-K α X線マッピングおよび(d)に示している球状物からのEDXAスペクトルの結果から、

Fig. 3 SEM — EDXA on ash from the Frond
(a) Scanning electron micrograph
(b) EDXA spectrum for (a)
(c) Distribution map of Si-K α X-rays for (a)
(d) EDXA spectrum for sphere substances

Fig. 4 SEM — EDXA on ash from the Mesocarp
(a) Scanning electron micrograph
(b) EDXA spectrum for (a)
(c) Distribution map of Si-K α X-rays for (a)
(d) EDXA spectrum for sphere substances

これまでの他の部位での結果と同様、Siが球状物に局在していることが確認される。

3.2.4 果実殻 (Shell)

Fig. 5 には、Shell から得た灰分の SEM — EDXA 分析の結果を示す。Trunk および Frond と同様、浮遊状物と球状物が灰分中に含まれている。また、(b)に示す(a)の視野からのEDXAスペクトルより、Na, Mg, Al, Si, P, S, K, CaおよびFeなど多くの元素が含まれていることが分かる。しかし、ここでは、Trunk や Frond では見られなかった鉄 (Fe) が微量含まれている。(c)には、球状物に対するSi-K α X線のマッピングを、(d)には球状物に対するEDXAスペクトルを示しているが、球状物には、Siが局在化していることが分かる。

3.2.5 パーム核粕 (Kernel Cake)

Fig. 6 には、Kernel Cake から得られた灰分の SEM — EDXA 分析の結果を示す。Kernel Cake では、(a)のSEM写真に示す

Fig. 5 SEM — EDXA on ash from the Shell
(a) Scanning electron micrograph
(b) EDXA spectrum for (a)
(c) Distribution map of Si-K α X-rays for (a)
(d) EDXA spectrum for sphere substances

Fig. 6 SEM — EDXA on ash from the Kernel Cake
(a) Scanning electron micrograph
(b) EDXA spectrum for fluffy substances

ように、浮遊状物のみが観察され、針状結晶や球状物は観察されなかった。また、(b)に示すようにEDXA分析からは、Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca および Fe の存在が確認される。

Fig. 7 SEM — EDXA on ash from the EFB
(a) Scanning electron micrograph
(b) EDXA spectrum for (a)
(c) Distribution map of Si-K α X-rays for (a)
(d) EDXA spectrum for sphere substances

3.2.6 空果房 (EFB)

Fig. 7 には、EFB から得られた灰分の SEM — EDXA 分析の結果を示す。ここでも Kernel Cake 以外の部位と同様、浮遊状物と球状物が観察された。また、(b)に示すように、EDXA 分析からは Na, Mg, Si, P, S, K, Ca および Fe など多くの元素が検出された。(c)の Si-K α X 線のマッピングや、(d)に示す球状物からの EDXA スペクトルで Si-K α X 線の強いピークが見られたことから、これまでの他の部位での結果と同様、Si が球状物に局在していることが明らかである。

3.3 構成元素の比較

以上の結果から、アブラヤシの各部位から得た灰分を構成

Table 2 Inorganic constituents in ash from various parts of oil palm

Parts	Shapes	Elements									
		K	Si	Na	Ca	Cl	S	P	Mg	Fe	Al
Trunk	Needle	+	++	+++	+			+	+		
	Fluffy	++	+++	+	+	+	+	+	+		+
	Sphere	+	+++	++							
Frond	Fluffy	+++	+	+	++	+	+	+	+		
	Sphere	++	+++	+	+	+					
Mesocarp	Fluffy	++	+++	+	+		+	+	+	+	+
	Sphere	++	+++								
Shell	Fluffy	++	+++	+	+		+	+	+	+	+
	Sphere	++	+++						+	+	
Kernel Cake	Fluffy	+++	+	+	+		+	++	+	+	+
EFB	Fluffy	++	+++	+	+		+	+	+	+	
	Sphere	++	+++								

+++ : Extremely abundant

++ : Abundant

+ : Existing

する針状結晶と非晶の浮遊状物や球状物の構成元素をTable 2にまとめた。ここで、それぞれのEDXA分析における特性X線の強度の程度を高いものから+++、++、+と表記している。Trunkで針状結晶および球状物の2形態が見られたが、Kernel Cakeでは非晶の浮遊状物のみであり、その他の部位では、浮遊状物と共に球状物が灰分中に含まれている。なお、球状物や針状結晶にはそれぞれSiおよびNaが局在し、浮遊状物にはKまたは/およびSiが局在し、その他の元素Na, Ca, S, PおよびMgが微量ながら常に存在している。さらに部位によっては、Cl, Fe および Alが見出された。

構成元素については、いずれの部位でもK, Si, Na, Ca, S, PおよびMgが存在し、つねに8～9元素が見い出される。しかし、ClはTrunk および Frondに、FeはShell, Mesocarp, Kernel Cake および EFBに、AlはTrunk, Mesocarp, Shell およびKernel Cakeにのみ存在しており、部位によって存在する元素の種類が異なることが明らかである。また、最も量の多かった元素2種を比較すると、Trunk, Mesocarp, Shell, EFBでは、SiおよびKであるが、Frondでは、KおよびCaであり、Kernel Cakeでは、K および Pである。

このように、アブラヤシでは、部位によって含まれる元素の種類や量が大きく異なることが明らかである。そこで種々のバイオマス資源の灰分との比較を以下に行ってみる。

アブラヤシは被子植物の単子葉類に分類される多年生植物であるが、被子植物の多年生植物で双子葉類であるシラカンバ(広葉樹)⁴⁾あるいは裸子植物の一種であるブラックスプルース(針葉樹)³⁾といった木材では、灰分含量は0.5wt%以下でありアブラヤシに比べ非常に低く、主要な元素としてCa, K, Mgが含まれていることが報告されている。

一方、単子葉植物の一年生植物である稲わら¹¹⁾、麦わら¹²⁾では灰分含量はそれぞれ7.6wt%, 9.8wt%と高く、構成元素はSiとKが多く含まれていることが報告されている。また、籾殻¹³⁾についても同様にSiとKが主要構成成分であるとの報告がある。さらにトウモロコシの茎¹⁴⁾についても5.8wt%の灰分が含まれ、Siが最も高く、次いでMg, Ca, Kの順に存在することが明らかとなっている。

これらの結果から、アブラヤシがいずれの部位においても多量の灰分を含有し、Frond, Kernel Cakeでは異なるものの、Trunk, Mesocarp, Shell, EFBにおいてSiおよびKが主要な元素であるという本研究結果は、単子葉類に共通する特徴的なものであるとも捉えられるが、生育地の土壌などの影響も無視できない因子の一つであると考えられる。

4. 結 言

本研究で明らかとなったアブラヤシ灰分を構成する元素は、生体の生命活動に必須な元素を多く含んでいる。したがって、現状、FrondやTrunkはプランテーション地に未利用のまま放置させているが、これらの部位に含まれる元素を土壌へ還元する意味では有効である。

しかしながら、生鮮果房(FFB)は、果実からの油糧の採取のため林地から工場へと搬出され、その結果、含有するすべての無機元素が林地から持ち出されたことになる。搾油後、分

離されたMesocarp, Shell, Kernel Cake および EFBは、必要に応じて工場のボイラーの熱源、活性炭原料、家畜の飼料として利用されている。また、これらをプランテーション地に還元する場合もあるが¹⁵⁾、有効利用されずに廃棄されている場合が多い。

このような状況の下、アブラヤシの種々の部位が有効に利用される総体利用が強く望まれるが、一方で持続可能なアブラヤシのプランテーションを可能にするためには、持ち出された無機成分の林地への還元を考慮した有効利用が重要となる。その際に本研究の成果が役立つことを願っている。

謝 辞

本研究で用いた試料は、マレーシア工科大学のFarid Nasir Bin Hj Ani教授、マレーシア科学大学のWan Rosli Wan Daud教授およびIr Mohd Omar Ab Kadir教授より供与いただいたものであり、ここに御礼申し上げる。

文 献：References

- 1) 坂志朗, バイオディーゼルのすべて,(アイピーシー), p.9 (2006): Saka, S., All about Biodiesel, (IPC Publisher), p.9 (2006)
- 2) 芝田正志, マヘンドラ バーマン, 東野陽介, 宮藤久士, 坂志朗, 日エネ誌(投稿中): Shibata, M., Varman, M., Tono, Y., Miyafuji, H., Saka, S., *J. Jpn. Inst. Energy* (Submitted)
- 3) Saka, S., Goring, D. A. I., *Mokuzai Gakkaishi*, **29**, 648(1983)
- 4) Saka, S., Mimori, R., *Mokuzai Gakkaishi*, **40**, 88(1994)
- 5) Sata, V., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., *J. Materials in Civil Engineering*, **16**, 623(2004)
- 6) Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., *Waste Management*, **27**, 81(2007)
- 7) Chu, K. H., Hashim, M. A., *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **77**, 685(2002)
- 8) Zainudin, N. F., Lee, K. T., Kamaruddin, A. H., Bhatia, S., Mohamed, A. R., *Separation and Purification Technology*, **45**, 50(2005)
- 9) Mohamed, A. R., Lee, K. T., Noor N. M., Zainudin, N. F., *Chem. Eng. Technol.*, **28**, 939(2005)
- 10) 佐伯浩, 走査電子顕微鏡図説(日本林業技術協会), p.196-198(1982): Saiki, H., Sosa-denshi-kenbikyo Zusetsu (Nihon Ringyo Gijyutsu Kyokai), p.196-198(1982)
- 11) Lang, T., Jensen, P. A., Knudsen, J. N., *Energy & Fuels*, **20**, 796(2006)
- 12) Thy, P., Jenkins, B. M., Grundvig, S., Shiraki, R., Leshner, C. E., *Fuel*, **85**, 783(2006)
- 13) Siriwardena, S., Ismail, H., Ishiaku, U. S., *Polym.Int.*, **50**, 707(2001)
- 14) Arvelakis, S., Folkedahl, B., Dam-Johansen, K., Hurley, J., *Energy & Fuels*, **20**, 1329(2006)
- 15) 田中良平, 小杉昭彦, 森隆, 日エネ誌, **86**(6), 368(2007): Tanaka, R., Kosugi, A., Mori, Y., *J. Jpn. Inst. Energy*, **86**(6), 368(2007)