

マレーシアにおけるパーム残渣を用いた燃烧発電とエタノール製造の共存に関する分析

An analysis of coexistence of power generation and ethanol production using oil palm residue in Malaysia

永 富 悠 * · 山 本 博 巳 ** · 山 地 憲 治 *** · 岩 崎 博 **** · 山 田 興 一 *****
 Yu Nagatomi Hiromi Yamamoto Kenji Yamaji Hiroshi Iwasaki Koichi Yamada

In this study, we developed the linear optimization model considering the locations of oil palm mills, the transportation cost of oil palm residue (Empty Fruit Bunch) and scale economy of plant. Using the model, we calculated the optimal locations of plants and the product of energy in Malaysia. Especially, we changed energy selling price and analyzed coexistence of power generation plants and ethanol production plants. We obtained the following results. (1) If the power selling price is 6JPY/kWh and the ethanol price is 30JPY/l, only ethanol production plants are constructed. (2) If the power selling price is 12JPY/kWh and the ethanol price is 25JPY/l, both power generation plants and ethanol production plants are constructed. (3) Type of plant depends on the amount of empty fruit bunch used in each plant. When more than 2,000kt empty fruit bunch is used, ethanol production plants are constructed.

Keywords: empty fruit bunch, scale economy, biomass transportation, power generation, ethanol

1. はじめに

現在，バイオマス資源として残渣系バイオマスの利用が検討されている．パーム油精製過程において排出される残渣系バイオマスである Empty Fruit Bunch(EFB)は現在単純焼却され，その灰が肥料として用いられるか，そのまま廃棄されておりエネルギー回収がほとんど行われていない．マレーシアにおいてオイルパームは主要な農作物である．作付面積はマレーシア国土の約 15%の約 400 万 ha にも及び，年間で約 6,000 万 t のオイルパーム(FFB)が生産されている．今後の生産量の伸びも期待されており，それに伴う EFB の増大が予想される．

本研究では Empty Fruit Bunch(EFB)に着目し，そのエネルギー利用に関する検討を行った．EFB のエネルギー利用法の中でも燃烧発電と今後の技術革新が期待されるエタノール製造を分析対象とし，マレーシアにおいて EFB を用いた燃烧発電プラント，エタノール製造プラントの最適化に関する評価を行うことを本研究の目的とする．

パーム油を生産する過程において 1t のオイルパームから 0.2t のパーム油が生産され，同時に 0.2t(含水重量)の EFB が排出される．マレーシアでは年間約 1,300 万 t 前後のパーム油が生産されており 約 1,400 万 t の EFB が排出されている．また，マレーシアには 370 のパーム油精製工場がある¹⁾．それらを州単位で分類し，その分布状況を表 1 に示す．

表 1 各州のパーム油精製工場数と精製能力¹⁾

state	mills	Capacity(t/y)
PENINSULA		
Perlis	0	0
Kedah	3	548,000
Perak	45	8,205,320
Penang	3	438,000
Selangor	26	3,878,800
Negeri sembilan	13	2,614,138
Melaka	3	603,263
Johor	67	14,618,400
Pahang	66	13,343,200
Kelantan	9	1,619,200
Terengganu	11	2,571,200
ISLAND		
Sabah	98	22,253,000
Sarawak	26	4,886,400
SUM	370	75,578,920

2. マレーシアにおけるパーム油精製工場の分布

* (財)日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット 研究員
 〒104-0054 東京都中央区勝どき 1-13-1 イヌイビル・カチドキ
 e-mail: nagatomi@edmc.ieej.or.jp

** (財)電力中央研究所 社会経済研究所 主任研究員, 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 客員准教授

*** 東京大学 大学院工学系研究科 電気工学専攻 教授

**** 成蹊大学 理工学部 特別研究員

***** 東京大学 理事

3. 評価モデル^{2,3)}

EFB の輸送コスト及び燃焼発電プラント、エタノール製造プラントの規模の経済を模擬するために Dijkstra 法及び 0.7 乗則を用いてモデルを作成した。そしてモデルを用いてプラントの最適な配置、設備規模、発電量及び生産エタノール量等に関して分析を行った。

3.1 計算の全体像

マレーシアにおいてパーム油精製工場が存在する全 12 州を更に 24 に分けたノードにおいて燃焼発電プラント、エタノール製造プラントを建設するか否かを考慮する。

全 24 の候補ノード中に建設ノードを仮定し、プラントを建設するか否かの組み合わせ毎に、以下に定式化する計算モデルによってシステム総収支最大化の最適化計算を行う。そして、その組み合わせの中で最もシステム総収支が良い計算結果を選択する。

3.2 定式化

・システム総収支

$$J = \sum_m \sum_n (SELL_{m,n} - (CSF_{m,n} + CSV_{m,n} + CST_{m,n})) \quad (1)$$

$m=1$: 燃焼発電, $m=2$: エタノール製造, n : 全 24 候補ノード, $SELL_{m,n}$: 収入, $CSF_{m,n}$: 固定費, $CSV_{m,n}$: その他経費, $CST_{m,n}$: 輸送費

・固定費

$$CSF_{m,n} = PFC_m * CAP_{m,n} \quad (2)$$

PFC_m : 単位設備規模あたり建設費, $CAP_{m,n}$: 設備規模

0.7 乗則を用いて規模の経済を模擬した結果、単位設備規模あたり建設費及び総建設費は図 1 のようになる。

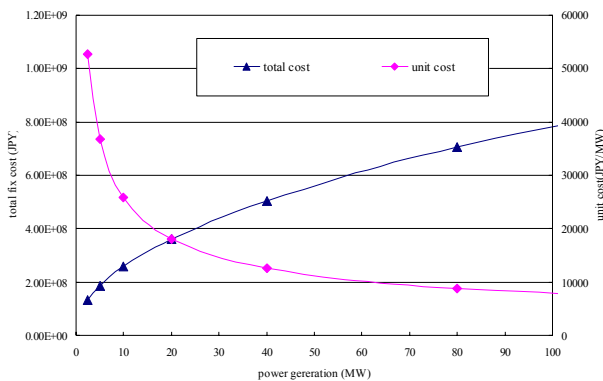


図 1 総建設費及び単位設備規模あたり建設費 (燃焼発電プラント)

・その他経費(燃焼発電)

$$CSV_{1,n} = VC_1 * CSF_{1,n} \quad (3)$$

VC_1 : O&M 費

・その他経費(エタノール製造)

$$CSV_{2,n} = VC_2 * CAP_{2,n} * UT_2 \quad (4)$$

VC_2 : 生産量に対する可変費, UT_2 : 稼働率

・輸送費

$$CST_{m,n1,n2} = \sum_{n1} ((TRNPCA * DST_{n1,n2} * ROAD + TRNPCR) * TCP_{m,n1,n2}) \quad (5)$$

$TRNPCA$: 単位距離あたりの単位重量輸送費, $DST_{n1,n2}$: ノード $n1$ - $n2$ 間直線距離, $ROAD$: 道路係数, $TRNPCR$: 距離に依存しない単位重量輸送費, $TCP_{m,n1,n2}$: ノード $n1$ から $n2$ への EFB 輸送量

道路係数とは直線距離を基に道路のうねりなどを考慮し、道路上の実移動距離を算出するために用いる係数である。本研究では資源の輸送はトラックでの陸路の輸送を想定しているが、半島と島の間や半島内での船による輸送は考慮していない。同一ノード内直線距離は各ノードを円とみなした時の半径の 2/3 とし、ノード間距離は Dijkstra 法によって最短直線距離を求めそれぞれに道路係数をかけたものを輸送距離とする。輸送費は輸送距離及び輸送する EFB の重量によって決定される。

・設備規模(燃焼発電)

$$CAP_{1,n} = CV_1 * GE * \sum_{n1} TCP_{1,n1,n2} / (UT_1 * TIME) \quad (6)$$

CV_1 : EFB の発熱量, GE : 発電効率, $TCP_{1,n1,n2}$: ノード $n1$ から $n2$ への EFB 輸送量, UT_1 : 稼働率, $TIME$: 年間時間

・設備規模(エタノール製造)

$$CAP_{2,n} = CV_2 * \sum_{n1} TCP_{2,n1,n2} / UT_2 \quad (7)$$

CV_2 : 単位 EFB あたりのエタノール生産量, $TCP_{2,n1,n2}$: ノード $n1$ から $n2$ への EFB 輸送量, UT_2 : 稼働率, $TIME$: 年間時間

・売電収入(燃焼発電)

$$ESELL_n = CAP_{1,n} * UT_1 * TIME * EE * EPRICE_1 \quad (8)$$

$CAP_{1,n}$: 設備規模, EE : 発電端に対する送電端電力比, $EPRICE_1$: 売電価格

・ 焼却灰売却収入(燃焼発電)

$$ASELL_n = \sum_{n1} TCP_{1,n1,n2} * AR * APRICE \quad (9)$$

AR : 投入 EFB 重量に対する焼却灰重量 , APRICE : 焼却灰価格

・ 燃焼発電収入(燃焼発電)

$$SELL_{1,n} = ESELL_n + ASELL_n \quad (10)$$

・ エタノール売却収入(エタノール製造)

$$SELL_{2,n} = CAP_{2,n} * UT_2 / EDENS * EPRICE_2 \quad (11)$$

EDENS: エタノール密度 , EPRICE₂: エタノール売却価格

表 2 燃焼発電定数値

VC ₁ (%)	2
TRNPCA(JPY/(t-EFB·km))	5
TRNPCR(JPY/(t-EFB))	250
EPRICE ₁ (JPY/kWh)	6
APRICE(JPY/t)	3,600
UT ₁ (%)	85
ROAD	1
CV ₁ (kWh/t-EFB)	1,667
GE(%)	22
EE(%)	88
TIME(hours/year)	8,760
AR(%)	1

表 3 エタノール製造定数値

VC ₂ (JPY/kg-EtOH)	3.2
TRNPCA(JPY/(t-EFB·km))	5
TRNPCR(JPY/(t-EFB))	250
EPRICE ₂ (JPY/l-EtOH)	30
UT ₂ (%)	85
ROAD	1.25
EDENS(kg/l)	0.79
CV ₂ (kg-EtOH/kg-EFB)	0.18

表 2 , 3 の変数説明は各式を参照 .

4 . 結果と考察

本研究では , EFB のエネルギー利用法として燃焼発電及びエタノール製造を想定する . まずエネルギー利用法として燃焼発電のみを想定した場合とエタノール製造のみを想定した場合の個別の分析を行い , その上で , 二つの利用法が共存する場合に関する分析を行う .

4.1 共存の条件

燃焼発電とエタノール製造の両技術の共存に関する分析を行うために , 技術の選択に影響を及ぼすパラメータである電力料金 , エタノール価格を一定範囲内で変化させ , 各プラントの建設状況を分析した . 二種類のプラントを同時に全てのノードに関して探索する事は計算量が膨大となる .

そのため各プラント個別の分析において建設ノードとして選択されたノードを候補ノードとし , 探索を行った . 売電価格はマレーシアにおいて検討されている Small Renewable Energy Power Programme(SREP)によって価格補助がなされる事を想定し , 足元の 6 円/kWh から 12 円/kWh まで 2 円/kWh ずつ増加させる . 一方で , エタノール価格は足元の価格高騰が解消される事を想定し , 足元の 30 円/ℓ から 15 円/ℓ まで 5 円/ℓ ずつ減少させて分析を行った . 参考として売電価格をマレーシアにおいて現在想定される価格である 6 円/kWh , エタノール価格を 30 円/ℓ とすると , これらの価格においては燃焼発電プラントは建設されずエタノール製造プラントのみが建設される . 分析結果を表 4 にまとめる .

表 4 結果のまとめ

	15円/l	20円/l	25円/l	30円/l
6円/kWh	P	E	E	E
8円/kWh	P	E	E	E
10円/kWh	P	P	E	E
12円/kWh	P	P	P&E	E

注) P は燃焼発電プラントのみ建造されることを示し , E はエタノール製造プラントのみ建造されることを示す . また P&E は燃焼発電プラントとエタノール製造プラントが共存することを示す .

表 4 より売電価格 12 円/kWh , エタノール価格 25 円/ℓ において両プラントの共存が起こることがわかる . 以下ではこの共存状態に関して詳細に示す .

4.2 共存状態の分析

(1)共存状態のプラント配置

図 2 にマレー半島 , 図 3 にボルネオ島のプラント分布をそれぞれ示す . 尚 , 図中で赤色で示したノードに燃焼発電プラントが建設され , 青色で示したノードにエタノール製造プラントが建設される . 矢印は EFB の輸送方向を示す .

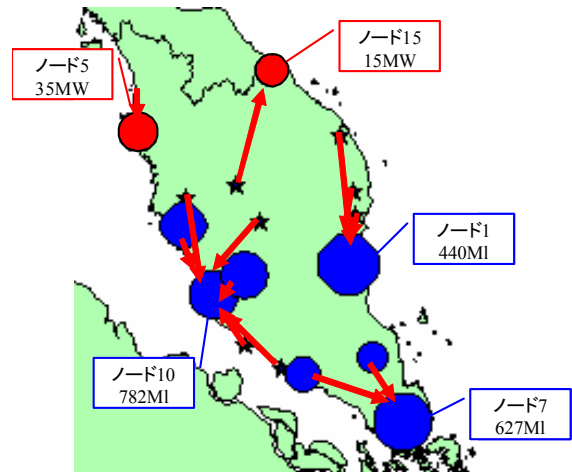


図 2 共存状態分析結果(マレー半島)

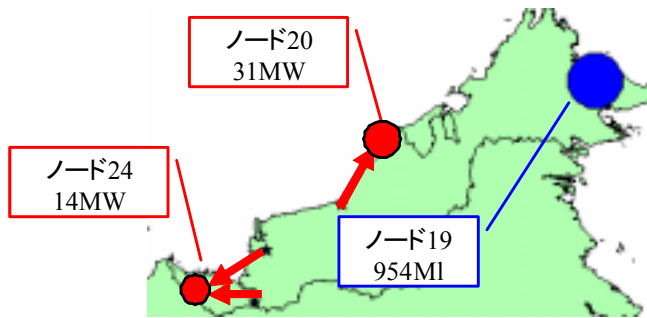


図3 共存状態分析結果(ボルネオ島)

図2, 図3よりマレー半島とボルネオ島, 併せて燃焼発電プラント計4つ, エタノール製造プラント計4つが建設される。投入される EFB は燃焼発電プラントで平均 483kt/年, エタノール製造プラントで平均 3,055kt/年と規模にして6倍以上の差が生じている。このように燃焼発電プラントとエタノール製造プラントの規模の差が生じる要因と両プラントの特色に関して検討する。

(2) システムの収支構造

プラントの規模の差異を検討するために輸送費を除いたプラントの限界収支と投入される EFB 量の関係を図4に示す。

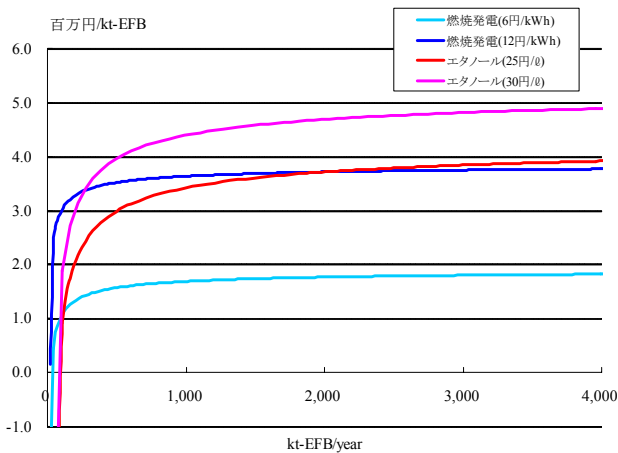


図4 EFB 投入量に対する輸送費を除いた限界収支

図4より, 売電価格 12 円/kWh, エタノール価格 25 円/l の条件下での共存状態において, EFB 投入量が 0~2,000kt 程度までは, 燃焼発電の方が輸送費を除いた限界収支が大きい。しかし, EFB 投入量が多くなり 2,000kt 以上になるとエタノール製造が有利になり, その後規模が拡大するにつれ, 収支差が広がっていく。また, 参考として EFB 重量あたりの輸送費はノード間距離 150km の輸送で 1.0(百万円/kt-EFB), 550km で 3.0(百万円/kt-EFB)となる。

以上より, 燃焼発電とエタノール製造を比較するならば, プラントの固定費が大きいエタノール製造プラントは規模の経済の効果が大きいために原料を大量に回収し, 一定以

上の規模のプラントを建造する必要があると考えられる。今後マレーシアにおいて EFB のエネルギー利用法として燃焼発電及びエタノール製造を想定する際には分散的に燃焼発電を導入するのか, ある程度資源を集約してエタノールを製造するのが重要な検討事項になると考えられる。

5. まとめ

本研究では, マレーシアにおけるパーム油精製工場の配置, パームの残渣である EFB の資源輸送コスト, プラントの規模の経済などを考慮した線形最適化モデルを作成した。そしてそれを用いてマレーシアにおける EFB を用いた燃焼発電プラント及びエタノール製造プラントの最適な立地, 設備数, 設備規模, 発電量及びエタノール生産量等を分析した。シミュレーション分析により以下の結果が得られた。

- 1) マレーシアにおいて現在想定される売電価格 6 円/kWh, エタノール価格 30 円/l においては, 燃焼発電プラントは建設されずエタノール製造プラントが建設される。
- 2) 今回の条件下では売電価格 12 円/kWh, エタノール価格 25 円/l において燃焼発電プラントとエタノール製造プラントは共存する。
- 3) EFB のエネルギー利用法として燃焼発電及びエタノール製造を想定する際には EFB の資源の集約度によってそれぞれのプラントが選択される。

今後は廃棄物燃焼発電やセルロース系エタノール製造技術などに関する技術革新及びコスト低減と共に CDM 等の仕組みを組み合わせることによって, 本研究で取り上げたパーム残渣など残渣系バイオマス資源の効率的な利用が期待される。

参考文献

- 1) Malaysia Oil Palm Board (MPOB)
<http://www.mpob.gov.my/>
(アクセス日 2006.11.29)
- 2) 永富悠, 山本博巳, 山地憲治, 岩崎博, 山田興一; タイにおけるキャッサバパルプを用いたエタノール製造に関する分析, エネルギー・資源, 28-3, (2007), 39-44
- 3) 永富悠, 山本博巳, 山地憲治; マレーシアにおけるパーム残渣のエネルギー利用に関する分析. エネルギー・資源学会第 23 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, (2007), 355-358

お問合せ: report@tky.ieej.or.jp