Original Paper

Special articles : Biomass

特集：バイオマス

The Analysis on Performance of Microalgae-based Biofuel Production System Considering Regional Climate Condition and Transportation

Koji OSHITA, Takaaki FURUBAYASHI, and Toshihiko NAKATA

(Received March 12, 2010)

地域特性を考慮した微細藻類由来バイオ燃料生産システムの性能評価

大下紘史, 古林敬顕, 中田俊彦

Recently, the microalgae that can produce fats and hydrocarbons attracts a lot of attention as means to solve the issue of global warming. The purposes of this study are to design microalgae-based biodiesel fuel (BDF) production system using exhaust gas from thermal power plants and considering regional characteristics, and to analysis potential of the microalgae from the viewpoint of energy balance, CO₂ balance and fuel production cost. The system consists of five components: Culture, harvesting, extraction, transportation, conversion. In addition, the methodology of this study has three processes: Allocating microalgae culture plants and BDF production plants, optimizing transportation using Geographic Information System (GIS) with Network Analyst, and evaluating energy balance and CO₂ reduction of the system. Besides, to minimize BDF production cost, we change the number of BDF production plants and consider trade-off between transportation cost and BDF production plants costs. The result shows that microalgae-based BDF production system has high potential for CO₂ reduction and the possibility to competitive with the fossil fuel cost.

Key Words

Microalgae, BDF, Regional characteristics, GIS, Transportation optimization

1. 緒 言

近年、化石燃料の代替や地球温暖化防止を目的に、世界中でバイオ燃料の生産が進められている。そのような状況の中、新たなバイオ燃料資源として、微細藻類が注目されている。微細藻類とは、水中で単細胞や群体として存在し、酸素発生型の光合成を行う生物の総称であるが、これらの中にはCO₂と栄養塩を原料に、光合成によって細胞内に炭化水素を産生する種類が存在する。この炭化水素は、ディーゼル燃料に近い構造をしており、実用化が比較的容易であると考えられている。また、肥沃でない土地でも育つ上、他の油分作物と比較して単位面積あたりの収穫量も多く¹⁾、さらに食料競合しないといった利点を有しているため、世界中で微細藻類バイオマスの実用化に向けた実証試験が行われている。

米国では、エネルギー省がワークショップを主催し、ベンチャーや大学に積極的な投資を行うなど、国家戦略の一部となりつつある²⁾。また、オーストラリアでは、南オーストラリア研究所 (SARDI) と連邦科学産業研究機構 (CSIRO) を中心

としたコンソーシアムによるパイロットプラントを用いたバイオ燃料生産が計画されている³⁾。さらに、中国でも石炭火力発電所から排出されるCO₂を固定化する手段として微細藻類に注目し、バイオリアクター建設に向けて大規模な投資を行っている⁴⁾。日本でも、デンソーが軽油成分を産生する *Pseudochoricystis ellipsoidea* を用いてバイオ燃料を生産するプラントを開発中である⁵⁾。

アカデミックの分野でも、微細藻類バイオマス生産システムについて、エネルギーバランスや経済性に着目した研究が行われている。Molina ら (2003) は、微細藻類からエイコタペンサエン酸 (EPA) を生産する場合の経済性を評価している¹⁾。また、Chisti (2007) は、オープン型とクローズド型でバイオ燃料を生産した際の経済性を比較している⁶⁾。さらに、渡邊ら (2007) は、*Botryococcus braunii* を用いたバイオ燃料生産のエネルギーバランスと経済性をライフサイクルアセスメントにより評価している⁷⁾。

しかしながら、いずれの事例もある生産量を設定した、あ

Management Science and Technology Department, Graduate of Engineering, Tohoku University
6-6-11-815, Aoba-Yama, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 980-8579, Japan

東北大学大学院工学研究科技術社会システム専攻
〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-815

るいはプロセスを限定したケーススタディに終始している。対象地域やシステム範囲を設定し、地域特性やスケールアップなどを考慮して、微細藻類バイオマスの有用性を詳細に評価した事例は見られない。

本研究では、微細藻類の培養、収穫、油分の抽出、輸送、そして輸送用燃料であるBDF生産までをシステム境界として設定する。油分の原料となるCO₂の高濃度かつ安定的な供給と油分輸送量の最小化を図るため、微細藻類の屋外培養プラントとバイオディーゼル燃料（BDF）生産プラントの2種類を火力発電所に隣接することを想定した。

システム性能については、まず各火力発電所の使用燃料とCO₂排出原単位、そして周辺地域の天候データから、培養プラントの稼働率と微細藻類バイオマス生産量を評価する。次に、抽出した油分の輸送経路を、GIS（地理情報システム）を用いて最短経路を検出し、最適化する。さらに、BDF生産プラントの設置数を変化させ、油分輸送費とBDF生産プラント総費用のトレードオフを考慮し、BDFの生産コストを最小化する。なお、今回は対象地域として、日本の東北地方の沿岸域に位置する火力発電所を選定し、解析を行った。微細藻類由来のBDF生産システムのエネルギー収支、CO₂収支、BDF生産コストの観点から、微細藻類バイオマスの有用性を評価する。

2. 解析手法

2.1 微細藻類由来 BDF 生産システムの定義

本研究にて想定する微細藻類由来のBDF生産システムの概念図を、Fig. 1に示す。対象バイオマス資源は、太陽光、栄養塩、CO₂を利用して、体内に炭化水素（油分）を産生する微細藻類である。抽出した油分は輸送用燃料のBDFとして利用することを想定する。CO₂を高濃度かつ安定的に供給するため、屋外培養装置であるレースウェー（水路）を火力発電所に隣接して培養を行う。

システムの構成要素として、(1)培養、(2)収穫、(3)抽出、(4)輸送、(5)エネルギー変換の5つを考える。培養要素は、屋内の施設で培養を行う前培養と、ある程度成長が進んだ後、屋

外レースウェーで培養を行う本培養から構成される。培養期間は前培養、本培養それぞれ7日とし、栄養塩は人工的に供給する。また、レースウェーは幅11 m×長さ190 m×深さ0.3 m×2レーンのものを使用し、レースウェーにおける培養水の循環や送水はパドルホイールを用いる。収穫要素は培養した藻類の回収を表す。抽出要素は藻類からの油分抽出を表す。培養、収穫、抽出は培養プラントで行う。輸送要素は、培養プラントとBDF生産プラント間の抽出油分の輸送を表し、20 kLのタンクローリーでの輸送を想定する。エネルギー変換要素は、油分をBDFへと変換する過程であり、BDF生産プラントにて行う。これらの要素を用いて、微細藻類由来の油分を最終的にBDFまで変換するシステム設計手法の概念図をFig. 2に示し、それぞれの手順については以下に示す。なお、本研究はシステムの運営時に関わる各プロセスおよびシステム全体のエネルギー収支、CO₂収支、経済性の評価を行っており、設備建設時や抽出プロセスで発生する残さなど、システム境界の外に出たものは対象外としている。

2.2 システム構成要素の配置

システムの構成要素のうち、点要素である培養、収穫、抽出、エネルギー変換要素を配置した。まず、培養、収穫、抽出要素を含む培養プラントは、海水、温排水、CO₂を安定的に供給することができるよう、沿岸部に位置する火力発電所に隣接する。次に、いくつかの火力発電所および培養プラントに、BDF生産プラントを併設する。本研究では、培養プラントおよびBDF生産プラントの設置場所として、未活用の土地が多く、培養地が確保しやすい東北地方を想定した。また、隣接する火力発電所として処理排ガスのデータが得られた能代火力（秋田県）、酒田共同火力（山形県）、仙台火力（宮城県）、新地火力（福島県）、原町火力（福島県）、勿来火力（福島県）、広野火力（福島県）の7ヶ所を選定した。Table 1に各発電所のデータを示す^{8)~16)}。なお、仙台火力については、平成22年7月より運転開始予定の天然ガスコンバインドサイクルを想定した。7ヶ所すべてに培養プラントを設置する。その際、培

Fig. 1 System diagram of microalgae-based BDF production system

Fig. 2 Schematic diagram of methodology

Table 1 Thermal power plants data in Tohoku area

Thermal power plant	Fuel	CO ₂ emission coefficient ^{15) 16)} [t-CO ₂ /kWh]	Installed capacity ^{8) 16)} [MW]	Site Area ^{9)~14)} [ha]
Noshiro	coal	0.899	600 × 2	109.0
Sendai	LNG *	0.362	446	34.4
Sakata	coal	0.899	350 × 2	86.0
Haranomachi	coal	0.899	1,000 × 2	153.0
Hirono	heavy oil, LNG	0.449	1,000	132.0
	coal	0.899	600	
Nakoso	coal, heavy oil	0.899	250	69.7
		0.899	600 × 2	
Shinchi	coal	0.899	1,000 × 2	96.0

* Start up plan in July 2010

養プラントの面積は各発電所の敷地面積の50%を利用可能と想定した。

2.3 輸送の最適化

培養プラントとBDF生産プラントが立地する発電所間の各輸送経路を、最短となるように選択することによって、輸送距離を最適化する。最適化ツールとして、ArcGIS 9.3®と拡張機能ArcGIS Network Analyst®を使用し、最短経路検出アルゴリズム Dijkstra 法による解析を行った¹⁷⁾。解析に用いる道路情報データは、25000 数値地図（空間データ基盤）を用いた。

2.4 BDF 生産量の算出

システム全体のBDF生産量を算出するには、まず変換前の油分の生産量を求める必要がある。各発電所における油分生産量は、式(1)で求めることができる。

$$Q_{oil,i} = \frac{S_{cult,i}}{S_R \times T_{cult}} \times V_R \times d_{cult} \times \rho_{oil} \times AF_{cult} \quad (1)$$

$S_{cult,i}$ は発電所 i で利用可能な培養面積[m²]、 S_R はレースウエーの面積[m²]、 T_{cult} は本培養日数[day]、 V_R はレースウエーの容積[m³]、 d_{cult} は培養濃度[kg/m³]、 ρ_{oil} は微細藻類の油分含有率、 AF_{cult} は培養プラントの年間稼働率を表している。解析において、式(1)と発電所のCO₂排出原単位と設備容量、そして年間稼働率から算出されるCO₂の供給可能量を比較し、オペレーションの実現可能性を評価する必要がある。Table 2に、培養に関する設定条件を示す。培養濃度、培養必要日数は、先行研究を参照して、十分実現可能と考えられる値を設定した。また、レースウエーの規模は、日本の発電所の敷地面積に設置可能と考えられる任意の値を設定した。なお、本研究においては、式(1)のオペレーションが実現可能であることを確認している。

Table 2 Culture condition of target microalgae

CO ₂ use rate [%]	10 ¹⁹⁾
Oil content [wt%]	50 ¹⁹⁾
Biomass concentration in broth [kg/m ³]	1.0 ¹⁹⁾
Culture period [day]	14 ¹⁹⁾
CO ₂ demand for unit oil production[kg/kg-oil]	1.83 ⁶⁾
Raceway area [m ²]	4,180 ¹⁹⁾
Raceway depth [m]	0.3 ¹⁹⁾

式(1)から、システム全体のBDF生産量は以下の式で求められる。

$$Q_{\text{BDF}} = \sum_i (Q_{\text{oil},i} \times \eta_{\text{conv}} \times e_{\text{chem}} \times 0.9) \quad (2)$$

Q_{BDF} はシステム全体の年間BDF生産量[kL/yr], η_{conv} は油分からBDFへの変換効率, e_{chem} は油分からBDFへの変換係数(エステル化による体積増加率), 0.9はBDFの密度[kL/t]を表している。ここでは、変換効率 η_{conv} を95%¹⁸⁾, 油分からBDFへの変換係数 e_{chem} は1.246²⁰⁾とした。

3. システム性能の評価

3.1 エネルギー収支

システムのエネルギー収支は、システム全体で生産したBDFの発熱エネルギー量と、システム全体の消費エネルギー量の差で定義される。それぞれについて、一次エネルギーベースで算出する。まず、システム全体で生産したBDFの発熱量[MJ/yr]は、次式で求めることができる。

$$EO_{\text{total}} = Q_{\text{BDF}} \times \frac{LHV_{\text{BDF}}}{1000} \quad (3)$$

EO_{total} はBDFの発熱エネルギー量[MJ/yr], LHV_{BDF} はBDFの低位発熱量[MJ/L]である。

次に、システム全体のエネルギー消費量を以下の式で算出する。

$$EC_{\text{total}} = \sum_i \sum_j (EC_{\text{culture},i} + EC_{\text{harvest},i} + EC_{\text{extraction},i} + EC_{\text{transport},i,j} + EC_{\text{convert},i,j}) \quad (4)$$

Table 3に、エネルギー消費量に関するパラメータを示す。システム全体のエネルギー消費量は、各要素でのエネルギー消費量 EC [TJ/yr]の合計である。培養、収穫、抽出の各要素のエネルギー消費量は、それぞれ以下の動力機器を想定し、各培養プラントの規模や培養液の量などを用いて算出した。培養要素はパドルホイール、ブロー、ポンプ、収穫要素では

Table 3 Parameter of energy consumption

	[MJ/L-BDF]
Culture process	4.3 ¹⁹⁾
Harvesting process	0.66 ¹⁹⁾
Extraction process	2.0 ¹⁹⁾
Energy conversion process	1.0 ²⁰⁾

加圧式フィルタードラムとポンプ、抽出要素では精製、濾過、蒸留の各過程におけるポンプを、それぞれ考慮した。パドルホイールの動力は、Ronの研究事例²¹⁾を参考に算出した。加圧式フィルタードラムは、分離効率95%, 所用動力を6.99[kW/kL-油分]とした。ブローとポンプの動力は、圧力損失を考慮した全揚程と動力の関係式を用いて算出した。

$$P_i = \frac{\rho_i Q_i H_i g}{\eta_i / 100} \quad (5)$$

$$H_i = h_i + \frac{dp}{\rho_i g} \quad (6)$$

$$dp = f \frac{L_e}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (7)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.71 D} + \frac{2.52}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (8)$$

ここで、添字 i はblowerまたはpump, 添字 j はgasまたはwater, P_i は動力[kW], Q_i は流体の流量[m³/h], H_i は全揚程[m], h_i は実揚程[m], g は重力加速度[m/s²], η_i は効率[%], dp は配管内圧力損失[Pa], ρ_i は流体の密度[kg/m³], f は管摩擦抵抗[-], L_e はパイプラインの全長に抵抗の影響を考慮した相当長さ[m], D はパイプラインの直径[m], ε はパイプ粗さ[mm], Re はレイノルズ数[-]を、それぞれ表す。添字(i, j)の組合せは、(blower, gas)と(pump, water)である。ブローと、ポンプの入力値を、Table 4に示す。また、エネルギー変換におけるエネルギー消費量は、アルカリ触媒法利用時の負荷を想定した²⁰⁾。培養、収穫、抽出、エネルギー変換に必要な電力は培養プラントとBDFプラントが隣接する発電所から供給する。電力消費量を一次エネルギーに換算するため、電力の受電端へ1 kWhを送電するための投入熱量9.63 MJ/kWh²²⁾を用いた。

輸送については、培養プラントからBDF生産プラントまでの油分の移動を考慮する。輸送に必要なエネルギーは輸送用燃料(軽油)の低位発熱量36.3 MJ/Lを用いて算出する。

Table 4 Data for blower and pumps¹⁹⁾

	blower	pump (culture)	pump (harvest)	pump (refine)	pump (centrifugal)	pump (distillation)
Efficiency [%]	70	70	70	70	70	70
Length of pipeline [m]	1000	1500	400	100	100	100
Difference of elevation [m]	0	10	0	0	0	0
Ratio of equivalent length [%]	50	50	50	50	50	50
Diameter of pipeline [m]	3.0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Fluid density [kg/m ³]	1.21	1000	1001	1000	1000	1000
Fluid viscosity [10 ⁻³ kg/m-s]	2.15 × 10 ⁻²	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

以上より、システムのエネルギー収支 EB_{total} は次式で表わされる。

$$EB_{total} = EO_{total} - EC_{total} \quad (9)$$

さらに、本システムのエネルギー収支比 (Energy Payback Ratio; EPR) e を以下のように定義して、エネルギー面の効率を評価する。

$$e = \frac{EO_{total}}{EC_{total}} \quad (10)$$

e はシステム全体のエネルギー収支比である。

3.2 CO₂ 収支

CO₂ 収支の計算は、システム全体の CO₂ 削減量と CO₂ 排出量で考える。CO₂ 削減量は、軽油燃料を BDF に代替することで得られる。この軽油代替による CO₂ 削減量から、システム全体の CO₂ 排出量を差し引いたものを正味の CO₂ 削減量と定義する。輸送を除いた各プロセスの CO₂ 排出量は、各プロセスの消費エネルギーに、隣接する発電所の排出原単位を乗じて算出する。輸送プロセスについては、輸送用燃料の CO₂ 排出原単位に消費量に乗じて算出する。各発電所の CO₂ 排出原単位を Table 1 に示す。各プロセスで排出される CO₂ を足し合わせ、システム全体の CO₂ 排出量を算出する。以下に、算出式を示す。

$$CO_{2_total} = \sum_i \sum_j (CO_{2_culture,i} + CO_{2_harvest,i} + CO_{2_refine,i} + CO_{2_transport,i,j} + CO_{2_convert,j}) \quad (11)$$

$$CO_{2_transport,i,j} = FC_{ij} \times CO_{2_fuel} \quad (12)$$

$$CO_{2_reduction} = Q_{BDF} \times \frac{LHV_{BDF}}{LHV_{fuel}} CO_{2_fuel} \quad (13)$$

$$CO_{2_net} = CO_{2_reduction} - CO_{2_total} \quad (14)$$

CO_{2_total} はシステム全体の CO₂ 排出量 [t-CO₂/yr]、 CO_{2_fuel} は輸送用燃料の CO₂ 排出原単位 [t-CO₂/kL]、 $CO_{2_reduction}$ は軽油代替による CO₂ 削減量 [t-CO₂/yr]、 CO_{2_net} は正味の CO₂ 削減量 [t-CO₂/yr] を表す。なお、輸送用燃料の排出原単位は、軽油の CO₂ 排出原単位 2.62 t-CO₂/kL²²⁾ を用いる。

3.3 BDF 生産コスト

BDF の生産コストは、培養プラント総費用 (培養プラント建設費 + 運転費)、培養プラントと BDF 生産プラント間の油分輸送費、BDF 生産プラント総費用 (BDF 生産プラント建設費 + 運転費) の 3 つで決まる。以下の式 (15) ~ (19) を用いて、BDF の生産コストを求める。

$$C_{cult} = \sum_i C_{cult,i} = \sum_i \left[C_{\alpha} \left(\frac{S_i}{S_{\alpha}} \right)^{x_1} \times (CRF + OF_1) \right] \quad (15)$$

$$C_{trans} = \sum_i \sum_j (C_{unit,i,j} \times d_{ij} \times Q_{oil,i}) \quad (16)$$

$$C_{conv} = \sum_j C_{conv,j} = \sum_j \left[C_{\beta} \left(\frac{Q_{BDF,j}}{Q_{\beta}} \right)^{x_2} \times (CRF + OF_2) \right] \quad (17)$$

$$C_{total} = C_{cult} + C_{trans} + C_{conv} \quad (18)$$

$$P_{BDF} = \frac{C_{total}}{Q_{BDF}} \quad (19)$$

$C_{cult,i}$ と $C_{conv,j}$ は、それぞれ発電所 i , j に設置する培養プラン

トと BDF 生産プラントの建設費 [JPY] である。また、 S_i と $Q_{BDF,j}$ は、それぞれ発電所 i の培養面積 [ha] と発電所 j に設置する BDF 生産プラントの生産規模 [kL/yr] である。さらに、 S_{α} [ha] と C_{α} [JPY] は、それぞれ既存の培養プラントの面積と建設費を、 Q_{β} [kL] と C_{β} [JPY] は、それぞれ既存 BDF 生産プラントの BDF 生産量と建設費を示す。

x は規模の経済効果の割合を表すスケールファクターである。BDF 生産プラントについては、バイオ燃料プラントの代表的な値である $x_2 = 0.67$ ²³⁾ を採用する。培養プラントに関しては、生産量が菌株の種類や油分含有量など多くの要素によって変動するため、スケールファクター x_1 が一義に定められない。そこで、燃料生産量 Q を培養面積 S に置き換え、Fig. 3 に示されるように、過去の研究事例^{24)~26)} より累乗近似によって $x_1 = 0.42$ を算出し、この値を用いて各発電所に隣接する培養プラント建設費を求める。引用した培養プラントの建設費は米国のデータだが、日本国内でも同じコストで建設が可能であると仮定する。施設規模の変化に対し、レースウェーの設備費の変化が小さいため、培養プラントは BDF 生産プラントよりもスケールファクターが小さくなった。

CRF (資本回収係数) は、金利と設備の寿命によって決定さ

Fig. 3 Relationship between culture area and culture plant construction cost

Table 5 Parameter of cost

Culture plant	
Reference capital cost [million-JPY]	1,086 ^{24), 25)}
Reference plant size [ha]	100 ²⁴⁾
Scale factor [-]	0.42 ^{24), 26)}
OF (operation cost / capital cost) [-]	0.7 ²⁴⁾
BDF production plant	
Reference capital cost [million-JPY]	751 ²⁸⁾
Reference plant size [kL/yr]	1,825 ²⁸⁾
Scale factor [-]	0.67 ²³⁾
OF (operation cost / capital cost) [-]	0.07 ²⁷⁾
Interest rate	0.05
Depreciation period [yr]	20
CRF (Capital recovery factor)	0.0802
Transportation cost [JPY/km · ton]	15.7 ^{29) 30)}

れる。また、 OF は建設費に対する運転費の割合を示す。先行研究を参考に $OF_1=0.7$ ²⁴⁾、 $OF_2=0.07$ ²⁷⁾と設定する。 C_{cult} [JPY/yr]と C_{conv} [JPY/yr]はそれぞれ新規の培養プラントとBDF生産プラントの年間総費用を表す。さらに、 C_{trans} [JPY/yr]は油分輸送量 Q_{oil} [t/yr]に輸送単価 c [JPY/t·km]と距離 d [km]を乗じて算出する。輸送単価については、タンクローリーの減価償却費、維持費、人件費、輸送用燃料費を車輛の往復分を考慮して求めた²⁹⁾³⁰⁾。Table 5に、経済性に関するパラメータを示す。 C_{cult} 、 C_{trans} 、 C_{conv} の和を Q_{BDF} で除することで、BDF 1 Lあたりの生産コスト P^{BDF} [JPY/L]を算出する。

3.4 屋外培養プラントの稼働率に対する考察

本研究では、微細藻類の培養プラントとして、屋外レースウェーを想定した。屋外装置であるため、その稼働率を算出するには周辺地域の日射量および気温の影響を考慮する必要がある。まず日射量は、既存研究⁷⁾の報告から、東北地方の日射量およびその変化(全天日射の年平均11.8~13.7 MJ/m²、月最少3.9~8.4 MJ/m²³¹⁾)が微細藻類の増殖密度に与える影響は無視できると判断した。次に、微細藻類の最適な培養温度は、約20~30℃³⁾³²⁾といわれており、気温が低い時期は外部から熱を供給して水温を保つ必要がある。そこで、隣接する発電所からの処理排ガスおよび温排水を培養水や熱源として利用することを考える。温排水の量は、発電所の熱効率にもよるが、出力100万kWの火力発電所で25~45 m³/s程度³³⁾³⁴⁾とされている。この値は、本研究が想定しているシステムの水消費量を2~3桁上回っており、十分な供給量といえる。処理排ガスの熱を併用することにより、東北地方においても年間を通じて培養水の温度を20℃以上に保つことは可能である。また、ライニングの差異による影響は考慮していない。

以上より、本研究では屋外培養プラントを100%の稼働率で運用が可能であるとし、解析を行った。なお、システム全体の蒸散水量は年間600 mmと設定する³⁵⁾。これは、平均約1.6 mm/dayの水が蒸発することを意味する。

4. ケース設定

本研究では、BDFの生産コストの最小化を図るため、BDF生産プラントの設置数を変化させ、油分輸送費とBDF生産プラント総費用のトレードオフを考慮する。培養プラントとBDF生産プラント間の油分輸送の有無によりケースを設定し、ケース毎に年間総費用が最小になる生産プラントの設置地域と最適経路を求める。さらに、それぞれのケースにおけるエネルギー収支、CO₂収支、BDF生産コストを比較する。

・輸送を考慮しないケース (Case A)

4県7ヶ所の発電所すべてに培養プラントとBDF生産プラントを併設する。発電所間およびプラント間の輸送は行わない(1通り)。

・輸送を考慮するケース (Case B)

輸送を考慮し、いくつかの培養プラントでBDF生産プラントを共有することで、BDF生産プラント数を集約する。Case Bの解析にあたり、条件として、(1)生産プラント数

の上限を各県1つとすること(4県を対象とするため、設置数は1~4)、(2)福島県内に生産プラントを設置した場合、県内の他の発電所はその生産プラントに油分を輸送すること、の2つを設定した。この2つの条件を踏まえて、BDF生産プラントの設置数別に4つのケース(272通り)を設定する。

Case B₁: BDF生産プラントを1つ設置(7通り)

Case B₂: BDF生産プラントを2つ設置(144通り)

Case B₃: BDF生産プラントを3つ設置(117通り)

Case B₄: BDF生産プラントを4つ設置(4通り)

5. 解析結果および考察

輸送を考慮するCase Bにおける輸送の最適化結果をFig. 4に示す。この結果から得られた輸送距離とBDF生産プラントの生産規模を考慮して、システム性能を評価した。

5.1 エネルギー収支

各ケースのエネルギー消費量とエネルギー収支比をFig. 5に示す。本研究が対象としたシステムは、296~304 TJ/yrのエネルギーを消費し、年間36,822 kLのBDF生産が可能であ

Fig. 4 Optimized transportation path and amount of algal oil to convert into BDF in each BDF production plant

Fig. 5 Energy balance and energy payback ratio

る。この生産量にBDFの発熱量 33.0 MJ/L¹³⁾ を乗じると、獲得エネルギー量は1,215 TJ/yrとなる。これは、日本の自動車燃料需要の 0.1% (エネルギー換算) にあたる。

培養プラントとBDF生産プラントのエネルギー消費量はそれぞれ培養面積とBDFの生産量に比例することを想定している。そのため、いずれのケースにおいても、輸送以外のプロセスにおけるエネルギー消費量は等しい。培養プロセスがシステム全体の消費量の約 52 ~ 53% と最も大きい割合を占める。収穫プロセスと抽出プロセスはそれぞれ約 8%, 24% を占めており、培養プラントにおいてシステム全体の 8 割以上のエネルギーを消費する。変換プロセスにおけるBDF生産プラントのエネルギー消費量は全体の6.4~13.4%である。輸送によるエネルギー消費量は、システム全体の消費量の約 3% (Case Aは 0%) と小さいので、エネルギー収支やCO₂収支の観点から調達範囲を制限する必要はないと考えられる。

各ケースのエネルギー収支比を比較すると、輸送がない Case A がもっともエネルギー消費量が少ないため、エネルギー収支比が大きくなった。一方、輸送による消費エネルギーがもっとも多い Case B1 がエネルギー消費量も多くなり、エネルギー収支比も最小であった。しかし、上述したように輸送プロセスにおけるエネルギー消費の影響が小さいため、エネルギー収支比は 4.0 ~ 4.1 とケースごとに大きな差は見られない。

5.2 CO₂ 収支

各ケースのCO₂排出量を Fig. 6 に示す。BDF生産プラントが各プラントに電力を供給する火力発電所のCO₂排出原単位の違いから、エネルギー収支の結果とは異なり、BDF生産プラント数の変化とシステム全体の排出量間に相関はみられない。Case B1 は輸送によるエネルギー消費がもっとも多いが、生産プラントをCO₂排出原単位が小さい仙台火力に設置するため、システム全体のCO₂排出量はもっとも少なくなった。プロセスごとに比較すると、いずれのケースにおいても培養プロセスが約55~58%を占めている。また、収穫プロセスと抽出プロセスがそれぞれ約 9%, 24% を占めており、培養プラントでシステム全体の 9 割近くを排出している。輸送プロセ

Fig. 6 CO₂ emission

スと変換プロセスの割合は小さい。ただし、今回の結果はシステム運用時に消費する、電力の排出原単位の変動によるものであり、一般的にはエネルギー消費量に応じてCO₂の排出量も増加する。

ここで、本システムで生産したBDFの軽油代替によるCO₂削減量は 88,236 t-CO₂/yr である。この値から各ケースのCO₂排出量を差し引くと、システム全体で年間 64,519 ~ 65,578 t のCO₂が削減可能である。これは、日本の運輸部門におけるCO₂排出量の約 0.03% の削減に相当する。

5.3 システム年間総費用とBDF生産コスト

各ケースにおけるBDF生産コストを Fig. 7 に示す。生産プラントを集約することで、輸送費以上に年間総費用を削減可能であることが確認された。輸送がない Case A と比較して、Case B1 では年間総費用で 664 million-JPY, BDF 1 L あたりでは 18 JPY の費用削減が可能である。BDF 1 L あたりの生産コストは、141 ~ 159 JPY となった。2005 年から 2011 年までの軽油価格が 75 ~ 145 JPY/L で推移していることから、本研究が対象としたシステムで生産したBDFは、課税分を無視すれば化石燃料と経済的に競争可能性であるといえる。

Fig. 7 Annual total cost and BDF production cost

5.4 燃料生産コストの比較

5.3でもっとも安価な生産コストを示したCase B₁の値を、他のバイオマスおよび研究事例と比較したものをFig. 8に示す。生産効率の高さから、微細藻類由来のバイオ燃料は菜種³⁶⁾と比較して割安な生産コストを実現することが可能である。また、同じように微細藻類から燃料を生産した際の経済性を評価した他の研究事例と比較して、本研究では輸送とプラントの集約を考慮したことで、生産コストを低減できたことが確認できる。さらに対象とする発電所を増やし、収率を向上させることができれば、廃食用油由来の燃料生産コストを上回る経済性を実現することが可能であると思われる。

5.5 感度解析

これまでの結果から、生産プラントを1つだけ設置するCase B₁でBDF生産コストが最も安価になることが確認された。これを踏まえ、システムの経済性に大きく影響することが予測される(1)軽油価格、(2)培養面積、(3)培養濃度の3つについて、Case B₁を対象に感度解析を行った。培養濃度に関しては、限られた面積で多くの収量を得るため、高濃度培養の研究が行われている⁷⁾。今後、成長条件の確立や品種改良によって、本研究と同じ条件で高密度培養が可能ことを想定する。ただし、高密度培養時には、二次代謝産物が増殖を阻害する可能性も指摘されているため、本研究では増殖に影響が出な

Fig. 8 Comparison of fuel production cost

かったとされる2 kg/m³までを解析範囲とした。Fig. 9に、それぞれのパラメータを変化させた場合の解析結果を示す。

まず、軽油価格が上昇した場合、輸送費が増加するためBDF生産コストは増加する。しかし、培養プラントおよびBDF生産プラントの費用は増加しないため、生産コストへの影響は限定的である。軽油価格200 JPY/Lの場合、BDF 1 Lの生産コストは143.3 JPYであり、軽油価格100 JPY/Lの場合と比較して約1.9 JPYの上昇にとどまる。次に、培養面積を変化させた場合の影響を考える。培養面積の増加により、培養プラント総費用、輸送費、BDF生産プラント総費用のすべてが増加するが、BDFの生産量も増加するため、BDF生産コストは低減する。設定値比200%、すなわち各発電所の敷地面積と同じ広さの培養面積で生産を行った場合、BDF生産コストは98.0 JPY/Lとなり、現行の軽油燃料と比較して価格競争力をもつ。同様に、培養濃度を増加させた場合、輸送費とBDF生産プラント総費用は増加するが、培養プラント総費用には影響しないため、BDF生産コストは大きく低減する。変化率200%、すなわち培養濃度2.0 kg/m³のとき、BDF生産コストを78.4 JPY/Lまで低減することができる。培養面積の増加時よりもコストの削減効果が高く、事業を実現する上で培養濃度を向上させることが有効であるといえる。

Fig. 9 Sensitivity analysis for BDF production cost in Case B1

Table 6 The summary of analysis results

	Case A	Case B ₁	Case B ₂	Case B ₃	Case B ₄
Culture area [ha]	340	340	340	340	340
BDF production [kL/yr]	36,822	36,822	36,822	36,822	36,822
Production efficiency [kL/ha]	108	108	108	108	108
CP ^a capital cost [million-JPY/yr]	442	442	442	442	442
CP ^a operation cost [million-JPY/yr]	3,854	3,854	3,854	3,854	3,854
BPP ^b capital cost [million-JPY/yr]	842	451	497	570	649
BPP ^b operation cost [million-JPY/yr]	735	394	433	497	566
Transportation cost [million-JPY/yr]	0	69	79	60	23
Annual total cost [million-JPY]	5,872	5,208	5,304	5,422	5,533
BDF production cost [JPY/L]	159	141	144	147	150
Net energy value [TJ/yr]	920	911	912	914	917
Energy payback ratio [-]	4.1	4.0	4.0	4.0	4.1
Net CO ₂ reduction [t-CO ₂ /yr]	64,519	65,578	63,583	63,738	65,192

a) Culture plant

b) BDF production plant

6. 結 言

地域内の地理情報や各要素間の輸送経路最適化を考慮し、微細藻類由来BDF生産システムを設計した。また、BDF生産プラント総費用と輸送費のトレードオフによるシステム総費用の最小化に焦点をあて、システムのエネルギー収支、CO₂削減量、BDF生産コストを評価した。Table 6に、解析結果のまとめを示す。東北地方の火力発電所7ヶ所を対象とした解析結果から、以下のことが明らかになった。

- ・ BDF生産による発熱エネルギー量と軽油代替によるCO₂削減量は、システム稼働によるエネルギー消費量とCO₂排出量を上回っていて、他のエネルギーシステムに比べて優位性があるといえる。
- ・ 油分の輸送を考慮し、BDF生産プラントを集約することで、システム全体の年間総費用を低減することが可能となり、現行の軽油燃料と競合可能な経済性を持ちうる。
- ・ システム全体において、エネルギー消費量やCO₂排出量のうち最も大きな割合を占める要素は、藻類の培養プロセスで使用するパドルホイールやポンプといった機器の消費電力である。
- ・ CO₂収支の観点では、輸送を行わないケースが有利である。ただし、輸送のエネルギー消費量が全体に占める割合は3%程度と小さいため、生産コストを考慮すると、輸送を行い、生産プラントを集約することが望ましい。
- ・ さらなる生産コストの低減には、培養面積よりも培養濃度の増加が効果的である。

本研究は、東北地方の火力発電所を対象に解析を進めたが、他地域の火力発電所や製鉄所など、CO₂を大量に排出するプラント施設を対象に含めることによって、微細藻類バイオマスのさらなる収率と経済性の向上が期待される。

謝 辞

現地でのヒアリング調査にて、関連企業の担当者から貴重なデータおよび助言をいただいたことに感謝する。また、査読者から、有益な助言とコメントをいただいたことに感謝の意を表する。

文 献：References

- 1) Molina Grima, E., Belarbi E.-H., Ación Fernández, F. G., *Biotechnology advances*, **20**, 491-515 (2003)
- 2) U. S. Department of Energy, Biomass Program, Financial Opportunities : <http://www1.eere.energy.gov/biomass/recovery.html> (Last accessed: 2010.3.3)
- 3) Adelaidenow.com.au, SA's intention to focus on biodiesel production from algae has been supported by a review of the Australian biofuels sector : <http://www.adelaidenow.com.au/business/sa-business-journal/algae-leads-way-to-sustainable-biofuel/story-e6fredel-1225778152739> (Last accessed: 2010.3.3)
- 4) GreenMuse, Chinese Algae Farming : <http://www.greenmuse.com/blogs/eco-geek/1260-chinese-algae-farming.html> (Last accessed: 2010.3.3)
- 5) (株)デンソー：DENSO, <http://www.denso.co.jp/ja/news/event/tokymotorshow/2009/booth/biofuel/index.html> (Last accessed: 2010.3.3)
- 6) Chisti, Y., *Biotechnology advances* **25**, 294-306 (2007)
- 7) 筑波大学, 地球温暖化対策技術開発事業—微細藻類を利用したエネルギー再生技術開発成果報告書, (2007): Tsukuba University, Technology against global warming development business - The energy reproduction technology development result report which used a microalgae, (2007)
- 8) 経済産業省, 電源開発の概要, (2007): Ministry of Economy, Trade and Industry, The summary of the development of power resources, (2007)
- 9) エネルギー環境教育情報センター, 施設見学ガイド: The Information Center for Energy and Environment Education, Guide for visiting institutions, <http://www.icee.gr.jp/sisetudb/prev.php?id=377> (Last accessed: 2010.1.13)
- 10) (社)建築業協会, BCS賞: Building Contractors Society, BCS prize, <http://www.bcs.or.jp/prize/details/00207.html> (Last accessed: 2010.1.13)
- 11) 山形県酒田市: Sakata-shi, Yamagata prefecture, <http://www.city.sakata.lg.jp/Files/1/160580/html/HTML/143.html> (Last accessed: 2010.1.13)
- 12) 東北電力, 原町火力発電所PRホール: Tohoku Electric Power, Haranomachi thermal power plant PR hall, <http://www.tohoku-epco.co.jp/pr/harama.htm> (Last accessed: 2010.1.13)
- 13) 東京電力, 広野火力発電所の概要: The Tokyo Electric Power Company, Summary of Hirono thermal power plant, http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu04_j/images/040712c.pdf (Last accessed: 2010.1.13)
- 14) 常盤共同火力(株), 会社概要: Joban Joint Power, Company profile, http://www.joban-power.co.jp/k_kaisya/hatsuden.htm (Last accessed: 2010.1.13)
- 15) OECD, CO₂ emissions from fuel combustion 1971-2005, (2007)
- 16) 東北電力, 仙台火力発電所リプレース計画—環境影響評価書の概要: Tohoku Electric Power, Plan of Sendai thermal power plant replacement - The summary of the environmental assessment book, <http://www.tohoku-epco.co.jp/whats/news/2007/05/22a1.html> (Last accessed: 2010.1.13)
- 17) ESRIジャパン(株), ArcGISユーザーズガイド, (2007): ESRI Japan, ArcGIS users guide, (2007)
- 18) トヨタ自動車, みずほ情報総研, 輸送用燃料のWell-to-Wheel評価—日本における輸送用燃料製造(Well-to-Tank)を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書, (2004): Toyota motor corporation, Mizuho Information & Research Institute, Well-to-Wheel evaluation of fuel for transportation - Research report about GHGs emission for

- cused on Well-to-tank in Japan, (2004)
- 19) A personal communication with a private firm, 2008
- 20) 寺川卓志, 東野達, 日本エネルギー・資源学会誌, **29**(6), (2008) : Terakawa, T., Tohno, S., *Journal of Japan Society of Energy and Resources*, **29**(6), (2008)
- 21) Putt, R., Algae as a Biodiesel Feedstock: A Feasibility Assessment (DRAFT), (2007)
- 22) 経済産業研究所, (補論10) エネルギー源別標準発熱量の改訂について : The Research Institute of Economy, Trade and Industry, (Assistant theory 10) Revision of the normal calorific value according to the energy source, <http://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/download/pdf/2006EBXAN1000.pdf> (Last accessed: 2010.1.13)
- 23) 山田富明, 斉木隆, 斎藤熹敬, 本波康由, 横尾一, 第1回日本エネルギー学会バイオマス科学会議発表論文集, **28**, (2006) : Yamada, T., Sasaki, T., Saito, Y., Hon-nami, K., Yokoo, H., Collection of papers on 1st J. Jpn. Inst. Energy Conference on Biomass Science, **28**, (2006)
- 24) Benemann, J. R., *Trends in Biotechnology*, **5**(2), 47-53 (1987)
- 25) 日本エネルギー経済研究所, エネルギー・経済統計要覧, (2009)
- 26) Welssman, J. C., Goebel, R. P., Design and Analysis of Microalgal Open Pond Systems for the Purpose of Producing Fuels, Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado SERVSTR-231-2840 (1987)
- 27) Murphy, J. D., McCarthy, K., *Applied Energy*, **82**(2), 148-166 (2005)
- 28) 京都市環境政策局施設整備課 : Kyoto-shi Environmental Policy Bureau Recreational Facilities Division, <http://www.city.kyoto.lg.jp/kankyo/page/0000001904.html> (Last accessed: 2010.2.14)
- 29) 林野庁, バイオマス資源の利用手法に関する調査報告書, (2001) : Forestry Agency, Research report about method for using biomass resources, (2001)
- 30) 加納達也, *Best value*, **20**, (2008) : Kano, T., *Best value*, **20**, (2008)
- 31) 気象庁, 気象統計情報 : Japan Meteorological Agency, Weather statistics information, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html> (Last accessed: 2010.1.13)
- 32) Qin, J., Bio-Hydrocarbons from algae, RIRDC Publication No 05/025, RIRDC Project No SQC-1A, (2005)
- 33) 日本機械工業連合会, 調査・研究報告書—平成20年度高効率発電のための発電設備利用技術及び諸制約の調査報告書, (2009) : The Japan Machinery Federation, Research report - Research report on utility technology of generation facilities and some constraints for high efficiency generation 2008, (2009)
- 34) 中国電力, プレスリリース, 水島発電所1号機改造計画—環境影響評価準備書の概要, (2006) : The Chugoku Electric Power, Press release, Remodeling plan of Mizushima power plant No. 1 - The summary of environmental assessment preparation report, <http://www.energia.co.jp/press/05/p060110a.html> (Last accessed: 2010.1.13)
- 35) ASAHIネット, 備考(湖面の年蒸発量の緯度分布) : Asahi net, Recital (The latitude distribution of annual evaporation quantity from the surface of the lake), <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/note/note0301.html> (Last accessed: 2010.1.13)
- 36) 経済産業省, 国産バイオマス燃料の供給安定性及び経済性, (2002) : Ministry of Economy, The supply stability and economy of the domestic biomass fuel, (2002), <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g30922b42j.pdf> (Last accessed 2010.2.4)
-