

DEA を適用したバイオマス利活用の多基準評価

森本英嗣 星野 敏 九鬼康彰

京都大学大学院農学研究科, 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

要 旨

本研究は、地域のバイオマス利活用を評価するため、企業や事業体の経営効率を分析する DEA (包絡分析) を適用して、現在のバイオマスタウン 195 地区の経営効率性 (物質循環効率, 温暖化防止効率, 経済効率) について評価し、その結果を考察した。そして、バイオマス利活用に関する評価への DEA の適用可能性を提案した。評価の結果、バイオマスタウンの現状および構想案は、いずれも物質循環効率の向上を強く指向しているが、温暖化防止や事業収益性はそれ程重点が置かれていないという課題を明らかにした。また、経営効率の観点から、バイオマスタウンの実施規模の改善を提起した。これまでの費用便益分析や費用効果分析を援用した事業評価や政策評価に比べ、DEA を適用した場合、従来では見いだすことができなかった視点から事業の改善策や指針を示すことが可能になる点を指摘した。

キーワード: バイオマス, DEA, バイオマスタウン構想, 物質循環, 温暖化防止, 経済効率

1. 背景と目的

近年、農村地域はバイオマスを豊富そして潜在的に保有している地域として見直され、全国の農村地域でバイオマスの利活用による循環型社会の形成が推進されている。また、これから循環型社会を目指した取り組みを検討している地域も増えてきているが、多くの地域が、目標 (経済収益, 環境負荷軽減, 地域発展) 達成のために本当に有効な取り組みなのか、どこかにマイナスの影響は出ていないか、より良い代替案があるのではないかと、といった疑問を抱えつつ、模索している。

バイオマス利活用に関する評価については、小林・柚山 (2006) が温室効果ガス, エネルギーの観点から LCA 手法を適用して、肉牛・耕種複合経営地区の評価を行った。間々田・田中 (2006) は経済面について、CVM (Contingent Valuation Method) を適用し、住民のバイオマスに対する理解度、妙高市における半炭化装置に関する評価を行った。

さらに、バイオマスの利活用に関する評価ツールも開発されている。磐田・島田 (2008) は家畜排せつ物過剰に対する問題解決策の費用対効果を検討できる環境・社会便益評価モデルを構築した。さらに、森本ら (2009) は、マテリアルフロー分析に特化したモデル (農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」, 2006) をベースに、バイオマス利活用が地域に与える経済効果, あるいは温室効果ガス排出, エネルギー消費を評価する「バイオマス総合利活用評価モデル」を開発した。

このように、バイオマス利活用に対する評価は当初、エネルギー, 温室効果ガスそして事業収益など評価軸の異なる

項目についてそれぞれ単独に分析・評価されてきたが、現在はそれらを総合的に包括した評価ツールの開発へとシフトしている。

一方、行政機関が行う政策の評価に関する法律 (2001) の施行により、政策評価の導入が積極的に進められ、「評価」は避けて通れない課題となっている。バイオマス利活用による循環型社会形成を目指すために策定される「バイオマスタウン構想」についても策定段階で事前評価を行い、構想の妥当性を検証する必要がある。バイオマス利活用については、地域によってバイオマスの賦存量あるいは地理・社会条件といった個々の制約があり、そのような状況下では、一律に各事業主体 (自治体など) 間の比較分析をすることは困難である。

政策や事業評価の手法については、費用便益分析や費用効果分析などが実用化されている。しかし、現実社会の複雑化、価値観の多様化により、便益や効果も多様化してきている中、単一の費用便益 (効果) 指標で評価することに限界が生じている。算出の際の重み付けの恣意性をいかに排除するかが課題となっている。そこで、筆者らはこの恣意性を排除し、併せて、事業の効率的な改善案も提示する手法である包絡分析 (DEA: Data Envelopment Analysis) に着目した。

DEA は経営の効率性を包括的に評価するための手法であり、寺田 (2003), 川本 (2008) および杉山 (2009) などによって経営工学分野をはじめ様々な分野で適用されている。バイオマス利活用の取り組みを一つの地域システムと捉え、DEA を適用して経済性や環境影響といった様々な評価軸を分析すれば、地域にとって効率的な利活用システム

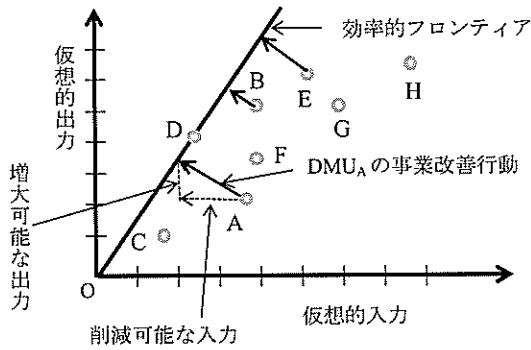


Fig.1 DEAの基本概念 (CCRモデル)
CCR model

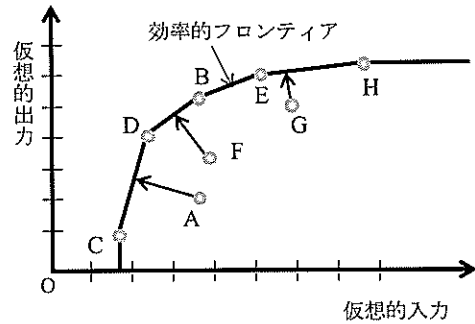


Fig.2 BCCモデル
BCC model

を評価することが可能となる。さらに、この結果を効率的な地区やシナリオと比較することで、効率の改善の方向を把握することが期待できる。

そこで、本稿では、DEAを適用したバイオマス利活用の評価手法を提案するとともに、同手法の適用可能性を検討する。

2. 研究方法

2.1 DEA

DEAは、経営効率分析ともよばれ、1978年に Charnes, Cooper and Rhodesによって提案されたものである。文字通り、経営効率や計画したことが効果的に行われたかどうかを評価する手法である。企業経営では、原材料・設備・労働力・資金・サービスなど多くのものを投入し、生産物・利潤・信用など多くのものを産出する。また、国や自治体などの公的機関では、資金・労働力・施設などの施策を行い、サービスや補助などの形で住民へと還元される。このように、企業や事業体など意志決定主体 (DMU: Decision Making Unit) は複数の投入と複数の産出をもつ経営主体である (本稿でいうDMUはバイオマスタウンを指す)。これら投入と産出の比はDMUの経営効率性を表すもので、DEAは多種類の投入と産出の効率性を容易に評価することができるという特徴をもつ。このとき、少ない投入で大きい産出を得ることを効率的と捉える (刀根, 1993; Cooper et al., 2007)。

DEAは効率性を決定する要因データの重みを固定せず、それぞれのデータが評価上最も有利となる重み付けをした上で、他のDMUとの比較を行う。例えば、バイオマス利活用という活動は、資源 (入力) を投入して便益や効果 (出力) を産出する活動とみなせる。このときの効率性を測定する入出力が複数ある場合、各項目に重み付けして、単一の仮想的入力、仮想的出力に換算する。ここで、入力 $x \in R^m$ と出力 $y \in R^s$ のDMUが n 個 ($n=1, 2, 3, \dots, k$) あるとする。比率尺度の最大値は1として、効率が1に近いほど効率的である。比率尺度が1のときD効率的といい、そのDMUを優位集合と呼ぶ。逆に1より小さいときはD非

効率的という。このときのDMU^kの仮想的入力 (VI^k) と仮想的出力 (VO^k) は以下の式のとおりである。

$$\text{仮想的入力: } VI^k = \sum_{i=1}^m v_i x_i^k$$

$$\text{仮想的出力: } VO^k = \sum_{r=1}^s u_r y_r^k$$

ここで、 v_i, u_r はそれぞれ入力値 x , 出力値 y の重みである。

2.1.1 CCRモデル

DEAの基本的モデルはCCRモデルである (Fig.1)。Fig.1の場合、A~HのDMUのうち最も効率的なものはDとなり、OとDを結ぶ直線を効率的フロンティアと呼ぶ。この線上にあるDMUがD効率的であり、これに近づくため、Aは入力値を削減する、あるいは出力を増大することでD効率的となる。このときのDMU^kのD効率をCCR θ^k とすると、以下の最適化問題の解として表すことができる。

(CCRモデル主問題)

$$\text{目的関数: } \min CCR\theta^k$$

$$\text{制約式: } \begin{cases} CCR\theta^k x^k - VI^k \geq 0 \\ y^k - VO^k \leq 0 \\ v_i, u_r \geq 0 \end{cases}$$

(CCRモデル双対問題)

$$\text{目的関数: } \max CCR\theta^k = U^T y^k$$

$$\text{制約式: } \begin{cases} V^T x^k = 1 \\ U^T y_r \leq V^T x_i \\ y^k - VO^k \leq 0 \\ U \geq 0 \end{cases}$$

$$(i=1, 2, \dots, m), (r=1, 2, \dots, s)$$

ここで、 $V^T = (v_1, v_2, \dots, v_m) \in R^m$, $U^T = (u_1, u_2, \dots, u_s) \in R^s$ は、それぞれ入力値、出力値に対する重みである。

2.1.2 BCCモデル

CCRモデルは、対象DMU全体に対して一つのD効率を求めるもので、Fig.1のDと同等の入出力比をもつDMUがD効率となる。これに対して、BCCモデルはDMUの規模に応じてD効率を算出するモデルである (Fig.2)。つまり、

効率的フロンティアで結ばれている C, D, B, E, H が優位集合 (D 効率=1) である。DMU^k の D 効率を BCC θ^k とすると、以下の最適化問題の解として表すことができる。

(BCC モデル主問題)

$$\begin{aligned} & \text{目的関数: } \min BCC\theta^k \\ & \text{制約式: } \begin{cases} BCC\theta^k x^k - VO^k \geq 0 \\ y^k - VO^k \leq 0 \\ \sum_{i=1}^m v_i = 1, \sum_{r=1}^s u_r = 1 \\ v_i, u_r \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

(BCC モデル双対問題)

$$\begin{aligned} & \text{目的関数: } \max BCC\theta^k = U^T y^k + c \\ & \text{制約式: } \begin{cases} V^T x^k = 1 \\ U^T y_r + c \leq V^T x_i \\ y^k - VO^k \leq 0 \\ U \geq 0 \end{cases} \\ & (i=1, 2, \dots, m), (r=1, 2, \dots, s) \end{aligned}$$

ここで、 $V^T = (v_1, v_2, \dots, v_m) \in R^m$, $U^T = (u_1, u_2, \dots, u_s) \in R^s$ は、それぞれ入力値、出力値に対する重みである。CCR モデルは Fig.1 より効率的フロンティアは一定 (比例的) であるのに対し、BCC モデルは Fig.2 のように、原点を通らず、現存する DMU を凸型に包む効率的フロンティアを示すモデルである。

Fig.2 より、D 非効率な A, F, G は図中矢印の方向へ改善することで D 効率となり得る。このとき、近くの D 効率的 DMU を参照するのだが、A は C と D, F は D と B, そして G は E と H を参照して改善する。この参照される回数を参照回数と呼ぶことにする。

本研究ではバイオマスタウンを対象とするが、各自治体が保有するバイオマスの種類や量はそれぞれ異なるため、バイオマス利活用を実施する規模の大きさも様々である。そこで、本稿では、規模の大きさを考慮した効率性を算出する BCC モデルを採用する。

2.2 分析の枠組み

2.2.1 分析範囲

対象とするバイオマスは Table 1 のとおりである。バイオマスは大きく廃棄物系、未利用系、資源作物に分けられ、それぞれは収集から変換、製品利用の範囲が少しずつ異なる。そこで、分析におけるシステム境界は、廃棄物系及び未利用系の場合、収集・運搬から変換を経て製品利用までとし、資源作物は、それに収集の前段階として栽培を追加した範囲とする (Fig.3)。

2.2.2 対象とする変換技術

対象とする変換技術は、現在実用段階にある技術を対象とした。それら変換技術は、堆肥化、メタン発酵、バイオディーゼル燃料化、炭化 (廃熱利用)、直接燃焼発電、小規

Table 1 対象とするバイオマス
The main sources of biomass

区分	内訳
生活系	食品廃棄物 食品産業生ゴミ (産業廃棄物)
	家庭廃棄物 生ゴミ, 紙ゴミ, 廃食用油 (一般廃棄物)
	下水系汚泥 下水道汚泥, 浄化槽汚泥, し尿処理汚泥, 集落排水汚泥等
林産系	廃材 製材工場残材, 建設廃木材, 剪定枝 (街路樹, 庭木等)
	林業副産物 間伐材, 林地残材
農畜産系	家畜排泄物 牛, 豚, 鶏のふん尿
	農業副産物 わら類, もみ殻, 畑作残渣等
	資源作物 エネルギーの原料として栽培される農作物 (多収稈米, ソルガムなど)

模ガス化発電・熱利用, ペレット化 (熱利用), チップ化 (熱利用) そしてエタノール化である。

2.2.3 設定条件

主な設定条件は以下のとおりである。

- ①堆肥化は高速で完熟堆肥を製造する強制発酵型と従来の堆積発酵型が混在すると考えられるが、将来的に電力と燃料を使用する強制発酵施設での完熟堆肥化に移行する。
- ②炭化では炭化物を土壌改良材として利用し、炭化時の熱を有効利用する。
- ③木質のペレット化では、製品利用施設としてペレットボイラーを同時に導入する。
- ④メタン発酵消化液は液肥として利用する。
- ⑤小規模ガス化発電は発電と同時に熱を利用する。

事業収益の分析において、原料の調達費、維持管理のための人員数などの条件は文献等によるほか、ヒアリング調査結果を組み合わせ設定した (Table 2)。また、現状と構想の試算条件を合わせるため、すべての再資源化物は利用・販売されるものとする。

2.2.4 バイオマス資源総合利活用評価モデル (総合モデル)

本稿で用いるモデルは、バイオマスとして利活用できる有機物を対象に、物質、キャッシュ、エネルギー、温室効果ガス (GHGs) の移動量と収支を原単位法により分析するものである。バイオマス発生地域は家畜、食品産業、人間 (家庭)、農地、森林・林業・製材業、集落 (都市域) とし、複数のバイオマス変換施設及び系外を含めた構造をもつ。これら複数の領域をコンパートメントと呼び、これらコンパートメント間を移動する物質、エネルギー、キャッシュの量はフローとして表現されている。当該モデルは、物質 (重量及び成分) フロー、エネルギーフロー、GHGs フロー、キャッシュフローに分けて構築されている。例として Fig.3 にエネルギーフローの基本構造を示す。

Table 2 事業収益分析のための主な設定
Main condition setting for economic efficiency evaluation

経済収支 (EB)	収入-支出=製品販売収入-(施設減価償却費+維持管理費+資源調達費)
施設償却費	耐用年数で償却するとして計算 耐用年数は15年 金利4%を想定 補助金は考慮しない
維持管理費	電力料金 15 円/kWh 燃料代 重油 40 円/L, 軽油 70 円/L 人件費 4,500 千円/人・年
資源調達費	林地残材 17,000 円/t
逆有償はマ	製材工場残材, 稲わら, もみ殻 1,000 円/t
イナス(▲)	家畜排泄物▲500 円/t, 生ゴミ▲15,000 円/t 下水系汚泥▲15,000 円/t, 剪定枝▲20,000 円/t 建設発生木材▲5,000 円/t, 資源作物(飼料稲を仮定)
製品販売費	木炭 1,000 円/t, 堆肥 5,000 円/t, 液肥 1,000 円/t, ふん尿炭化物 10,000 円/t, 生ゴミ炭化物 1,000 円/t, BDF50 円/L, 熱 2 円/MJ, 電力 15 円/kWh ペレット 33,000 円/t

*農林水産省農林水産技術会議 (2006) 参照

3. 使用データ

分析対象はバイオマスタウン構想を公表している 268 市町村 (2010 年 3 月現在) の内の構想案を明記している 195 市町村とした。地域のバイオマス利活用を評価するためには、その地域で発生するバイオマスの特色を反映することが必要である。その点において、総合モデルでは、物質収支量や環境負荷排出量などを地域のバイオマス量をもとに原単位法などによって評価しており、得られたデータは今回の分析に利用できると判断した。対象とする評価項目は事業収益性と環境負荷軽減効果とする。これらを用いて現状と構想におけるバイオマス利活用状況の比較分析を行う。さらに地域に賦存するバイオマス量をもとに7つの地域に分類し地域別にみた分析も行う。地域分類については 3.4 に記す。

また、刀根 (1993) によると、DMU の入出力項目の選定は一般的に以下のようにすべきだとされており、これらに留意して DEA 分析を行う。

- ①全 DMU について数値が正である。
- ②比較評価対象における入力対出力の効率性をよく表しているものとする。
- ③出力値が小さい方が好ましい場合は、逆数をとったり、大小を逆転させたりするなどの前処理が必要である。
- ④入出力項目の数値の単位は任意にとってよい。例えば、人数、金額、面積、重量などである。

3.1 入力項目

入力項目は資源投入に相当すると考え、各バイオマスタウン構想に記載されている利活用量とする。それらを Table

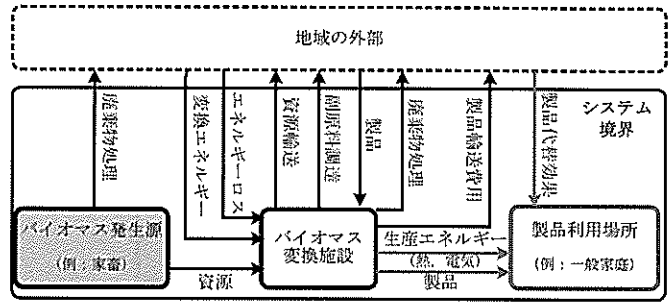


Fig.3 バイオマス資源総合利活用評価モデルの基本構造とシステム境界 (例: エネルギーフロー図)

Basic structure of evaluation model and system boundary (e.g., Energy flow)

Table 3 燃料・エネルギー・化学肥料のエネルギー消費原単位および GHGs 排出係数

Calorific values and GHGs emission factors of Fuels, Electricity and Chemical fertilizer

	エネルギー消費量	GHGs 排出係数
軽油	43.1 MJ/L	3.0 CO ₂ eq.-g/L
灯油	39.9 MJ/L	2.8 CO ₂ eq.-g/L
重油	41.3 MJ/L	2.8 CO ₂ eq.-g/L
電力	10.3 MJ/kWh	0.58 CO ₂ eq.-g/kWh
化学窒素	32.9 MJ/N-kg	1.64 CO ₂ -g/N-kg
肥料リン酸	21.1 MJ/P ₂ O ₅ -kg	1.4 CO ₂ -g/ P ₂ O ₅ -kg

参照元: 小林・柚山 (2006) p.16

1 のように生活系, 林産系, 農畜産系の 3 項目に分類し, 炭素量に換算した値とする (Table 4, 入力項目)。

3.2 出力項目

出力項目はバイオマスの利活用によって得られる効果に相当すると考え、経済収支 EB (百万円, Table 2) および環境負荷軽減効果とする。後者については化石エネルギー消費抑制量 FC (kL-重油), 温室効果ガス排出削減量 RG (t-CO₂eq.), 廃棄物量 Wa (t-C), 化成肥料代替量 CF (t-N) および製品利用量 PC (t-C) の 5 項目とした。FC については重油換算し, RG は CH₄ ガス, N₂O ガスを CO₂ 換算した値を含む。燃料や化学肥料の消費や生産に関する原単位は Table 3 のデータを使用した。Table 4 はこれらを考慮して出力した 5 地区のデータを示したものである。

FC (kL-重油) = 化石エネルギー代替量*

一施設運営に必要なエネルギー (熱, 電力) 量 (*BDF, ペレット, 炭, 熱, 電力, エタノールの生産量)
RG (t-CO₂eq.) = 代替エネルギー利用による GHGs 排出削減量-施設運営による GHGs 排出量

Wa (t-C) = 賦存量-利活用量

CF (t-N) = 堆肥+メタン発酵消化液

PC = バイオマスのマテリアル利用量: (炭素換算量)

これらのうち EB, FC, RG の 3 項目は負値をとる DMU が存在するため, ①より以下の式を用いて, 最小値が 1 と

Table 4 現状の入力項目と出力項目の例 (195 地区のうち 5 地区を抜粋)
Example of input and output in present condition (excerpting 5 districts of 195)

DMU	入力項目 (Y)			出力項目* (VO)					
	生活系 (t-C)	林産系 (t-C)	農畜産系 (t-C)	EB (百万円)	FC (kL-重油)	RG (t-CO ₂ eq.)	Wa (t-C)	CF (t-N)	PC (t-C)
1	13	33	94	24	24	55	6,134	4	129
2	261	430	3	170	170	527	31,742	11	828
3	398	0	638	94	94	-198	12,788	28	340
4	38	5	2,860	382	382	-553	10,504	314	2,860
5	129	5	650	199	199	379	464	41	743
経済効率	○	○	○	○					
温暖化防止効率	○	○	○		○	○			
物質循環効率	○	○	○				○	○	○

DMU の並びは、バイオスタウン構想を公表した地域順である。

*出力項目の数値は正規化する前の数値である。

なるように正規化する。また、廃棄物量は③より逆数をとった値とする。

$$\text{正規値} = 1 - \{ \min(Y) - y_i \}$$

(Y: 出力値の集合, y_i : i 市町村の出力値)

3.3 評価項目

バイオマス利活用の評価軸を「経済効率」、「温暖化防止効率」そして「物質循環効率」の 3 つに設定した。その理由として、堆肥化のように物質循環に着目して温室効果ガス排出削減には目が向けられていない地域も少なくない、と考えたからである。バイオマス利活用の評価においてこれまで、環境影響の改善と事業収益の両立に関してよく議論されてきた (例えば松田 (2008))。農業農村工学分野においてもバイオマス利活用に関しては家畜ふん尿や稲わら、もみ殻など農業副産物の堆肥利用 (物質循環) が重視されてきた。ようやく近年、エネルギー変換技術の発展とともに、メタン発酵処理を中心に、化石エネルギー代替物の生産に伴う温室効果ガス排出削減を目的とした利活用が推進されるようになってきた (例えば清水・柚山 (2010))。

3.3.1 経済効率

バイオマス利活用を実施する事業の採算性を捉えるため、投入に対する経済収支を求める。そこで仮想出力 (VO) を経済収支 (EB) としたときの比率尺度を求める。これを経済効率とする。

3.3.2 温暖化防止効率

バイオマス利活用による温暖化防止効果を測るため、VO を FC, RG としたときの比率尺度を求める。これを、温暖化防止効率とする。

3.3.3 物質循環効率

温暖化防止効率はバイオマス資源のエネルギー利用を含んだ評価項目であるのに対し、本項目はバイオマスのマテリアル利用に着目している。家畜ふん尿の堆肥化のように、

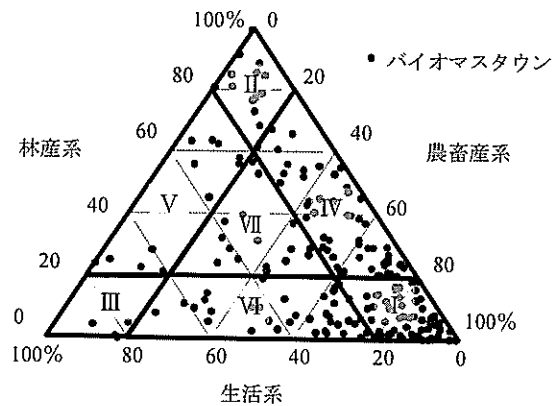


Fig.4 賦存するバイオマスの三相分布 (195 市町村)
Three-phase contribution of potential abundance (195 districts)

物質循環を象徴する変換でも、堆肥化する際に GHGs が排出されるため、バイオマス利活用については、温暖化防止とは別の軸を設ける必要がある。そこで、物質循環の効率性を測るため、VO を Wa, CF, PC としたときの比率尺度を求める。これを物質循環効率とする。

3.4 DMU の地域分類

バイオマスの賦存状況は地域によって様々である。人口の多い地域は生ごみ、農業が盛んな地域は農業副産物、そして山林面積の多い地域は間伐材や林地残材を多く保有している。そこで、本稿ではバイオマスの賦存種を大きく 3 つの系 (生活系, 農畜産系, 林産系) に分類した。この 3 つの系を軸に三角グラフを作成し、対象となる 195 市町村をプロットしたものが Fig.4 である。そして、賦存分布の割合から以下のように 7 つの地域に分類した。バイオマスの賦存分布別、つまり地域別に D 効率性を分析すれば、各地域内の効率的な市町村を抽出することができる。

I. 農畜産業地域: 農畜産系が 60%以上占め、生活系, 林産系がそれぞれ 20%未満

- II. 山間地域：林産系が 60%以上占め，農畜産系，生活系がそれぞれ 20%未満
- III. 都市域：生活系が 60%以上占め，農畜産系，林産系がそれぞれ 20%未満
- IV. 農山村地域：農畜産系と林産系で 80%以上を占める
- V. 中山間地域：林産系と生活系で 80%以上を占める
- VI. 都市近郊地域：生活系と農畜産系で 80%以上を占める
- VII. バランス型地域：どの種別も 20~80%の間を占める

4. 評価結果

現状と構想案を実施した場合の経済効率，温暖化防止効率，物質循環効率の結果を Fig.5, Fig.6, Fig.7 に示す。横軸はバイオマスタウンを表し左から No.1, No.2, ..., No.195 となる。

4.1 経済効率

現状において，優位集合 (D 効率=1) の数は 34 地区で，最小効率値は 8.8×10^{-4} ，平均値は 0.57 (標準偏差 SD: 0.32) となった。その中で参照回数が最も多かったのは No.188 で，107 地区の DMU に対して優位集合となった。

構想においては，優位集合の数は 14 地区で，最小効率値は 1.6×10^{-3} ，平均値は 0.16 (SD: 0.27) となった。その中で参照回数が最も多かったのは No.39 で，142 地区の DMU に対して優位集合となった。

4.2 温暖化防止効率

現状において，優位集合の数は 27 地区で，最小効率値は 6.5×10^{-4} ，平均値は 0.29 (SD: 0.36) となった。

その中で参照回数が最も多かったのは No.155 地区で，97 地区の DMU に対して優位集合となった。

構想においては，優位集合の数は 24 地区で，最小効率値は 4.6×10^{-3} ，平均値は 0.29 (SD: 0.33) となった。その中で参照回数が最も多かったのは No.48 地区で，134 地区の DMU に対して優位集合となった。

4.3 物質循環効率

現状において，優位集合の数は 44 地区で，最小効率値は 0.62，平均値は 0.85 (SD: 0.12) となった。その中で参照回数が最も多かったのは No.78 地区で，136 地区の DMU に対して優位集合となった。

構想においては，優位集合の数は 59 地区で，最小効率値は 0.85，平均値は 0.96 (SD: 0.04) となった。その中で参照回数が最も多かったのは No.78 地区で，66 地区の DMU に対して優位集合となった。

経済効率や温暖化防止効率に比べて，優位集合の数が多く分散が小さいことから，多くの地区で物質循環が高水準に実施されている，あるいは計画していることが分かる。また，参照回数が最も多いのが同じ No.78 地区で，物質循環に関する DEA において，No.78 は大きな影響力もつ DMU

であると位置づけられる。

4.4 地域別にみる効率性

分類した地域別に DEA を適用した評価結果を示したのが Table 5, Table 6 である。

現状，構想どちらの場合においても，全地区を対象にした結果と同様，自治体間の差は小さくなく，物質循環効率は高い水準となった。特に，都市域 (III) はどの地区も D 効率あるいはそれに近い結果を示した。温暖化防止効率と経済効率については，山間地域 (II) は他の地域に比べて平均値が高いが，分散も大きく山間地域内での差が見られる。一方，農山村地域 (IV) とバランス型地域 (VII) の平均値が他の地域に比べて低く，両地域における地域内差も大きくない。

4.5 規模の効率性

D 効率と判断された DMU について，その規模の効率性を検討した。ここでは，バイオマス利活用に関して，規模の変化によってさらに効率性を高める余地があることを示す。効率性の変動のタイプは，増加型，一定，減少型の 3 種類が存在する。増加型，減少型とはそれぞれ規模の拡大，縮小により効率性が向上することができる DMU で，一定とは現在の規模の維持が望ましい DMU を指す。

Fig.8 は各評価項目について，規模の効率性を示したグラフである。現状においては，増加型に該当する DMU はみられない。一定と減少型は，各評価項目について該当する DMU がみられ，減少型の方が多い傾向にある。つまり，現段階のバイオマスの利活用状況で効率的と評価されている地区でも，規模を縮小することでさらに効率性を向上することができるという結果を示している。

5. 考察

5.1 より効果的なバイオマスタウンの実現に向けて

今回の評価結果では，物質循環効率が低い水準で評価されていた。これは，バイオマスタウンで全体的に物質循環が効率よくなされていることを示唆している。バイオマスタウン構想を策定する際の条件とされているのが，「バイオマスの利用率が廃棄物系で 90%以上もしくは未利用系が 40%以上 (農林水産省，2004)」ということからも，このような結果を示したと考えられる。ただし，この条件は構想実現の際の目標基準であって，現状に関するものではないため，現状と構想で若干の差が生じた背景とも考えられる。

物質循環効率に比べ，他の評価項目に関しては，軒並み低い水準を示し，自治体間の差異がみられた。経済効率に関しては，構想の方が低い水準を示す結果となった。今回の事業収益性の試算の際，再資源化物はすべて利用・販売されるという過大な条件で評価を行ったが，このような水準を示したということは，現状ならびに構想案において，事業収益性の観点は重視されていない可能性を少なくとも

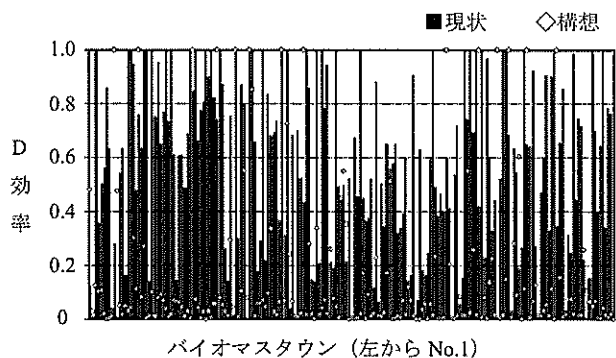


Fig.5 経済効率
Economic efficiency

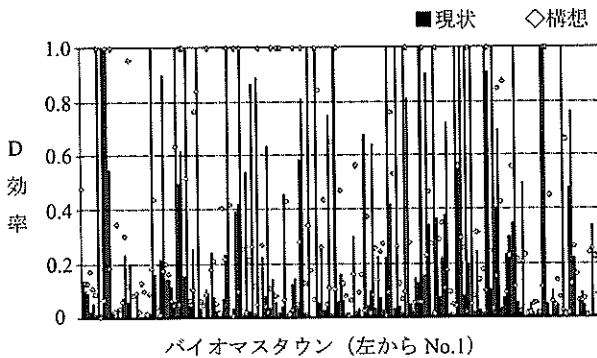


Fig.6 温暖化防止効率
Efficiency of preventing warming

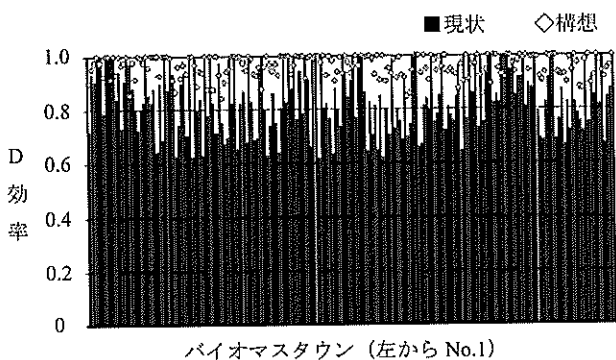


Fig.7 物質循環効率
Efficiency of material recycling

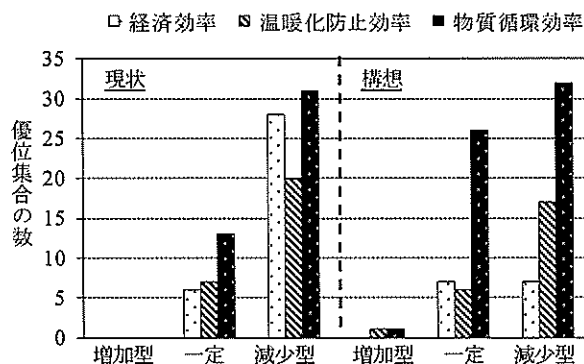


Fig.8 DMUの規模の効率性
Efficiency of Scale

Table 5 地域別評価の結果 (現状)
Result of regional evaluation (Present)

地域	現状								
	経済効率			温暖化防止効率			物質循環効率		
	最小値	平均値	SD	最小値	平均値	SD	最小値	平均値	SD
I	8.9×10^{-6}	0.10	0.21	3.5×10^{-3}	0.13	0.23	0.63	0.83	0.12
II	3.0×10^{-3}	0.29	0.38	0.022	0.33	0.39	0.72	0.91	0.10
III	4.5×10^{-3}	0.16	0.14	0.033	0.25	0.15	1.0	1.0	0.0
IV	1.4×10^{-3}	0.032	0.058	3.3×10^{-3}	0.065	0.14	0.63	0.80	0.12
V	1.4×10^{-3}	0.032	0.058	8.4×10^{-3}	0.21	0.36	0.71	0.89	0.10
VI	9.1×10^{-4}	0.11	0.28	1.6×10^{-3}	0.13	0.28	0.68	0.82	0.10
VII	6.9×10^{-4}	0.041	0.11	8.9×10^{-3}	0.051	0.11	0.64	0.90	0.09

Table 6 地域別評価の結果 (構想)
Result of regional evaluation (Plan)

地域	構想								
	経済効率			温暖化防止効率			物質循環効率		
	最小値	平均値	SD	最小値	平均値	SD	最小値	平均値	SD
I	3.7×10^{-7}	0.15	0.25	1.4×10^{-5}	0.16	0.26	0.91	0.97	0.030
II	5.3×10^{-3}	0.27	0.41	0.016	0.27	0.40	0.97	0.99	0.012
III	0.027	0.18	0.18	0.072	0.18	0.15	0.97	0.99	0.010
IV	6.8×10^{-4}	0.061	0.14	3.5×10^{-3}	0.076	0.16	0.86	0.95	0.039
V	1.4×10^{-3}	0.14	0.27	6.6×10^{-3}	0.14	0.27	0.89	0.96	0.039
VI	9.5×10^{-4}	0.090	0.18	3.4×10^{-3}	0.090	0.15	0.84	0.93	0.047
VII	6.8×10^{-4}	0.031	0.060	8.9×10^{-3}	0.033	0.024	0.86	0.91	0.040

示唆している。

バイオマスのマテリアル利用とエネルギー利用によって温暖化防止効率の違いが大きく異なることも示唆された。比較的低い水準を示した地区は、家畜ふん尿を堆肥化にしている地区に相当し、比較的高い水準を示した地区はメタン発酵処理や直接燃焼による発電を導入および計画している地域に相当している。つまり、バイオマスのマテリアル利用に偏っている地域の場合は、エネルギー生産のための原料としてシフト変換も必要であると考えられる。

5.2 バイオマスタウンの規模の効率性による圏域設定

規模の効率性については、全国的にも各地区で効率的に物質循環がなされているが、更なる向上を目指す場合は、現状維持か規模縮小がひとつの提案として示された。逆に、増加型に該当する地区はなく、バイオマスタウンの規模拡大による効率向上はみられないことが窺える。

経済効率については現状で規模の縮小をした方がむしろ効率的であることを示した。これについては、一つには、投入量を縮小し、経済収支を向上する指針をとる必要がある。バイオマスの収集範囲を小さくするといった、圏域の再検討が有効な改善策と考える。つまり、市町村や自治体単位での実施ではなく、バイオマスの流通や利用人口等を考慮することの必要性を意味する。市町村よりも小さい旧町や旧村レベルでの利活用システムの設定が必要と考えられる。今回、減少型に該当した地域は、一人あたりのバイオマス量(3つの系の総量)が平均よりも多い地域に相当し、これは、地域循環圏(環境省, 2008)の概念を援用すれば、コミュニティレベルでの利用圏域を設定し、市町村の中にいくつかの小規模レベルの利活用システムを築く形態を表すと考える。特に、林地残材やもみ殻、稲わらなどが広く薄く賦存しているような地域(本稿では、農山村地域や中山間地域に相当)では、再資源化物の利用先も広範囲に広がるという地理的制約、さらに平成の大合併による旧市町村間の自治組織との連携という行政的制約が課題となる。

6. 結言

バイオマス利活用によって得られる効果に関して DEA を適用して、地球温暖化防止、物質循環、事業収益を経営効率性という観点から評価した結果、現在のバイオマスタウンの実情を3点示すことができた。

第1に、バイオマスタウンの実施効果を抽出することができた。全般的に物質循環の効率性だけにこだわって実施されているあるいは計画されていることである。D 効率と評された地区(優位集合)というのは地域性に合った資源循環システムを構築していることを示している。その数は195地区のうち現状で44地区、構想で59地区見受けられた。

第2に、バイオマスタウンを運営する上での課題を抽出

することができた。温暖化防止効果や事業収益に関する視点を加える必要がある。この点に関しては、バイオマスを手マテリアルとして利活用している量が多い地域は、エネルギー生産の原料としての利活用へシフトするなどの方策をとることで効率性を向上することができる。

第3に、規模の効率性からみると、D 効率と評された地区でも、規模を縮小(拡大)することでより効率性を向上することができることを提示した。今回の結果では現在のバイオマスタウンの規模が多少大きいと評された地域が少ないことが分かった。そのような地域というのは、農山村地域など一人あたりのバイオマス量が多い地域や市町村合併により、あらゆるバイオマスを保有している(バランス型)地域であり、旧町や旧村などのコミュニティレベルまで縮小した利活用システムを構築する必要性を提示した。

以上のことから、DEA を適用することで、現在のバイオマスタウンの実情を映し出すことができたと思う。DEA は現段階で優位とされる企業や事業体を対照に、他を比較することができるという点に着目すると、農業農村工学分野における適用可能性も少なからずあると考える。

当分野では、優良事例の事例分析が多くなされている。これまで、これら有益なデータの蓄積実績をもとに、新たに実施しようとする事業(バイオマス利活用事業など)の事前評価やシナリオ分析をする場合、便益や効果への換算をせずに評価が可能な DEA を適用することで、従来の分析手法よりも容易にかつ、見出すことのできなかつた改善策や指針を導き出すことができるのではないかと考える。

謝辞:本研究は、農業農村工学会80周年記念事業「ニューフロンティア」プロジェクトによる研究成果の一部であり、第66回農業農村工学会京都支部に於いて報告した内容に加筆したものである。発表に際し、有益なコメントや情報をご教授して下さいました方々、ならびに本稿を執筆する際、ご指摘、ご指導頂いた皆様様に深く感謝申し上げます。

引用文献

- Cooper, W.W., Seiford, L.M. and Tone, K. (2007): *Data Envelopment Analysis - a comprehensive text with models, applications, references and DEA-Solver software*, Springer Science+Business Media, LLC.
- 磐田朋子, 島田荘平 (2008): 家畜排せつ物対策に伴う環境・社会便益評価モデルの構築(家畜排せつ物有効利用に向けた自治体予算配分に関する研究), 日本エネルギー学会誌, 87(9), 719-730.
- 環境省 (2008): 第2次循環型社会形成推進基本計画.
- 川本清美 (2008): 効率性評価からみた一般廃棄物管理への地域ソーシャル・キャピタルの活用, 計画行政, 31(2), 54-63.
- 小林 久, 柚山義人 (2006): LCA 手法を適用したバイオマス資源循環の評価, 農土論集, 241, 13-23.
- 間々田理彦, 田中裕人 (2006): 木質バイオマス利用に対する住民評価-新潟県妙高市を事例として-, 農村計画学会誌, 25 論文特集号, 407-412.
- 松田宗弘 (2008): バイオマスの時代へ 環境と経済の両立に向けた「バイオマス・ニッポン総合戦略」, 月刊地球環境, 34(4), 38-39.
- 森本英嗣, 土井和之, 星野 敏, 柚山義人, 九鬼康彰 (2009): バ

バイオマス利活用総合評価モデルの開発とその適用, 農村計画学会誌, 27 論文特集号, 317-322.

農林水産バイオリサイクル研究「システム化サブチーム」(2006): バイオマス利活用システムの設計と評価

農林水産省 (2004): バイオマスタウンの募集について, http://www.maff.go.jp/j/biomass/b_town/pdf/town_bosyu.pdf, p.5 (確認日: 2011/2/8).

農林水産省農林水産技術会議 (2006): イネで牛を育てる—飼料イネによる国産牛生産—, 農林水産研究開発レポート, No.15, p.12

清水夏樹, 柚山義人 (2010): エネルギー収支・経済性・環境負荷からみたバイオマス利活用シナリオの評価, 農村計画学会誌, 28 論文特集号, 243-248.

杉山 学 (2009): データ包絡分析法による JR と大手私鉄の事業活動効率比較—DEA/ウィンドー分析による JR 旅客各社の推移

—, 群馬大学社会情報学部研究論集, 16, 61-82.

寺田守正 (2003): 下水道事業評価における包絡分析法 (DEA) 適用の可能性, 同志社政策科学研究, 4 (1), 123-142.

刀根 薫 (1993): 経営効率性の測定と改善—包絡分析法 DEA による—, 日科技連.

柚山義人, 生村隆司, 小原章彦, 小林 久, 中村真人 (2006): バイオマス再資源化技術の性能・コスト評価, 農村工学研究所技報, 204, 61-103.

[2010. 4. 5. 受稿, 2011. 2. 14. 閲読]

[この研究論文に対する公開の質疑あるいは討議(4,000字以内, 農業農村工学会論文集編集委員会あて)は, 2011年10月24日まで受け付けます.]

Multi-Criteria Analysis for Biomass Utilization Applying Data Envelopment Analysis

MORIMOTO Hidetsugu, HOSHINO Satoshi and KUKI Yasuaki

Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Oiwake-cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto-city, Kyoto
606-8502, JAPAN

Abstract

This paper aimed to consider about material-recycling, preventing global warming, and economic efficiency on preset and planned 195 Biomass Towns applying DEA (Data Envelopment Analysis), which can evaluate operational efficiency entities such as private companies or projects. In the results, although the Biomass Town can recycle material efficiently, it was clarified that preventing global warming and business profitability was brushed off like it in Biomass Town Design. Moreover, from the point of view of operational efficiency, we suggested an improvement of the Biomass Town scale for more efficiency-enhancing applying DEA. We found that applying DEA was able to catch more improvements or indicator as compared with cost-benefit analysis and cost-effectiveness analysis.

Key words: Biomass, DEA, Biomass Town Design, Material Recycle, Preventing Global Warming, Economic Efficiency