

第6章 国際バイオエネルギー・パートナーシップ（GBEP）のバイオエネルギーの持続可能性指標における包括的評価手法の開発⁽¹⁾

林 岳

1. はじめに

近年、社会経済や環境への負の影響を軽減するためのバイオエネルギーの持続可能性への関心が高まっており、EUにおける再生可能エネルギー指令（RED）、英国の再生可能輸送燃料義務（RFTO）、オランダの持続可能なバイオマス生産（PSB）、ドイツにおける炭素認証に関する国際機関（ISCC）など、いくつかの国では自国で生産・消費されるバイオマスの認証制度を導入している。持続可能なバイオ燃料円卓会議（RSB）や責任ある大豆生産円卓会議（RTRS）、よりよいさとうきびイニシアティブ（BSI）、そしてスウェーデンのエネルギー会社が進める SEKAB やノルウェーのエコラベルである The SWAN など、いくつかの民間主体が自発的に持続可能性認証制度を自身のバイオエネルギー製品に導入している（van Dam(2008), Scarlat and Dallemand(2011)）。

国際バイオエネルギー・パートナーシップ（GBEP）もまた、2011年にバイオエネルギーの持続可能性指標を公表した。これは、バイオエネルギーの持続可能な生産と利用を評価する指標として、世界各国の政府レベルで合意された初めての指標である（GBEP(2011), p.11）。現在、GBEPでは指標の開発段階から普及段階へと移行し、指標を用いた評価の実施により得られるデータと経験を共有しようとしている。しかしながら、開発段階におけるいくつかの重要な課題が未だ議論されずに残されている。その1つは「持続可能性」の定義である。GBEPは科学的根拠、実用性、持続可能性との関連性の3点に基づいて指標を選択してきた。それでもなお、指標の中での持続可能なバイオエネルギーがどのようなものかは明確ではない。Mendoza and Prabhu (2003)は、あらゆる場面で通用する持続可能性概念を構築することは困難であると主張している。特に、GBEP指標は、国家・地域レベルで適用される点、持続可能性の3つの柱である環境、経済、社会を考慮しつつバイオエネルギーの全ライフサイクルを網羅している点、といった他の指標にはない特徴を有するため、独自の持続可能性評価の枠組みを構築する必要性が強く求められる。そして、もう一つの未解決の課題は、それぞれの指標を集計することができず、指標群は包括的評価手法とならないため、指標からは直接的にバイオエネルギーが持続可能なのか否かを直

接的に判断することができないという点である。したがって、指標を用いて持続可能性を判断するためには包括的評価手法を開発する必要がある。このような手法は政策担当者に有用な情報を提供し、バイオエネルギーの持続可能性を判断するのに有効な手法となる。

本研究の課題はバイオエネルギーの持続可能性を評価する GBEP の指標の包括的評価手法を開発することである。特に GBEP 指標をより利用しやすいものとするため、以下の 2 つの課題に取り組む。

- ・バイオエネルギーの持続可能性評価のための GBEP 指標を有効活用するためにどのような概念フレームワークが必要か。
- ・持続可能性を判断するためにどのように GBEP 指標を集計できるか。

持続可能性指標の理論的な背景は Martinet (2011)などで既に議論されているため、本研究の学術的な貢献は概念フレームワークを構築し、指標を数量化可能なスコアに集計することである。指標の集計には多基準分析 (MCA) を適用する。本稿の構成は以下のとおりである。第 2 節では持続可能性評価の概念的フレームワークについて解説する。第 3 節では指標の集計のための MCA について触れ、第 4 節では京都市におけるバイオディーゼル燃料 (BDF) 製造事業への GBEP 指標の適用事例に、開発された手法を試行的に適用した結果について解説し、第 5 節で結論をまとめる。

2. 概念的フレームワーク

(1) GBEP のバイオエネルギーの持続可能性指標

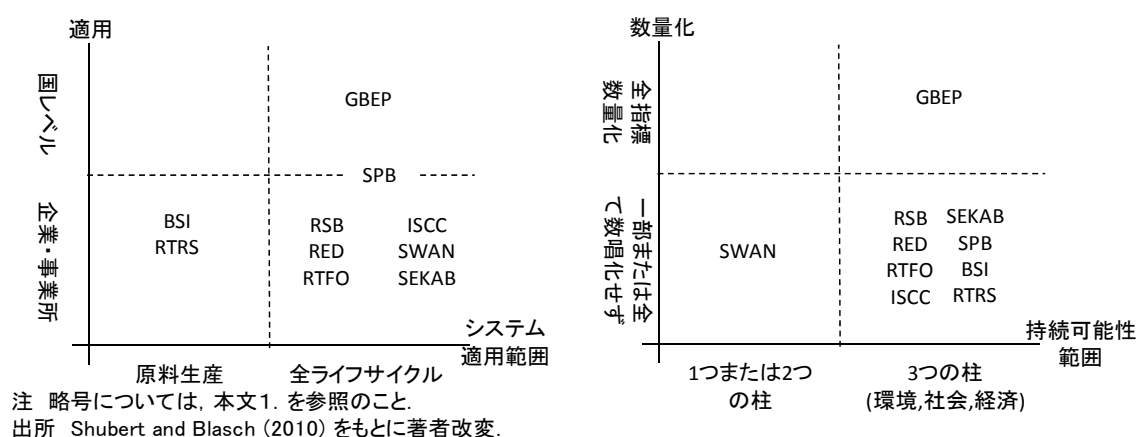
バイオエネルギーは地球温暖化防止の一手段と期待され、主に先進国を中心にここ 10 年ほどで生産が大きく拡大されてきた。しかしながら、2008 年に食料価格が高騰した際、バイオ燃料はその原因として非難された。さらに、バイオエネルギーの原料生産は環境や地球上の資源賦存に負の影響を与えている (Hein and Leemans(2012))。原料生産に伴う土地利用変化により、バイオ燃料は地球温暖化の軽減に貢献しないもしくは超長期の”償還期間”を伴ってのみ貢献する (Serchinger et al.(2008), Holtsmark(2010))。

これらの批判を受けて、GBEP は 2008 年より各国が持続可能なバイオエネルギーの生産・利用を評価、支援するためバイオエネルギーの持続可能性指標の開発に取り組み、2011 年に公表された。GBEP のバイオエネルギーの持続可能性指標の詳細については、第 4 章でも解説したが、その指標は 3 つの柱、環境、社会、経済に分類された 24 の指標か

ら構成されている。第1表には24の指標が掲げられている。GBEPの持続可能性指標は他の持続可能性指標と比べ独自の特徴を有する（第1図）。第1に、他の指標フレームワークに導入されている指標は大部分が記述的なもののなのに対し、GBEP指標は全ての指標が数量化される点である。第2に、他の指標フレームワークは企業・事業所レベルでの適用を想定しているのに対し、GBEP指標は国または地域レベルで適用することを意図している点である。第3に、GBEP指標は主に政策担当者による政策利用を意図して設計されている点である。

第1表 GBEP持続可能性指標一覧と比較対象

No.	指標名	単位	比較対象
1	ライフサイクル 温室効果ガス排出量	kg/GJ	化石燃料及び他のエネルギー
2	土壌質	パーセンテージ	他の農業生産活動
3	木質資源の採取水準	m3/ha/年, トン/ha/年	化石燃料及び他のエネルギー
環境	4 大気有害物質を含む非温室効果ガスの排出量	mg/ha, mg/MJ, パーセンテージ	化石燃料及び他のエネルギー
5	水利用と効率性	パーセンテージ	化石燃料及び他のエネルギー
6	水質	kg-N/ha/年, kg-P/ha/年	他の農業生産及び/または農用地の地域平均
7	生物多様性	km2, パーセンテージ	化石燃料及び他のエネルギー
8	バイオ燃料の原料生産に伴う 土地利用と土地利用変化	ha, パーセンテージ	石炭, 石油, ガス, ウランなどの化石燃料及び 伝統的バイオマス利用
9	新たなバイオエネルギー生産のための土 地分配と土地所有権	パーセンテージ	土地を必要とする他のエネルギー
10	国内の食料価格と食料供給	トン, 通貨単位, パー センテージ	土地の競合が生じるエネルギーまたは食料生 産に利用される他の投入物
11	所得の変化	通貨単位/家計/年, パー セント変化	他の農業部門, 化石燃料部門, 他のエネ ルギー部門
社会	12 バイオエネルギー部門の雇用	人, 人/MJ	化石燃料部門及び再生可能エネルギー部門
13	バイオマス収集のための女性・児童の不 払い労働時間	時間/週/家計, パー センテージ	伝統的バイオマス利用
14	近代的エネルギーサービスへのアクセス 拡大のためのバイオエネルギー	L/年, MJ/年, パーセ ンテージ	近代的エネルギー供給部門
15	屋内煤煙による死亡・疾病の変化	パーセンテージ	近代的エネルギー供給部門
16	労働災害, 死傷事故件数	件/ha, 件/MJ	化石燃料及び他のエネルギー
17	生産性	トン/ha, MJ/トン, トン /ha/年, USD/トン/MJ	化石燃料及び他の農業生産
18	純エネルギー収支	比率	化石燃料及び他のエネルギー, 下流での利用
19	粗付加価値	USD/年, パーセン テージ	全産業及びエネルギー
経済	20 化石燃料消費および伝統的バイオマス利 用の変化	MJ/年, USD/年	化石燃料及び他の再生可能エネルギー
21	職業訓練および再資格取得	%/年	化石燃料部門及び再生可能エネルギー部門
22	エネルギー多様性	指数(範囲: 0-1)	他のエネルギー
23	バイオエネルギー供給のための社会資本 および物流	数, MJ/年	化石燃料及び他の再生可能エネルギー
24	バイオエネルギー利用の容量と自由度	指数	化石燃料及び他のエネルギー



第 1 図 持続可能性評価手法の分類

(2) 本研究への GBEP 指標の適用

Barrera-Roldan and Saldivar-Valdes (2002)は指標を適用して持続可能な発展を評価する際の3つの問いを以下の3つ挙げている。(1)何を数量化しているのか、(2)持続可能な発展を把握するために指標を用いることにどのような意義があるのか、(3)強い持続可能性と弱い持続可能性のどちらの持続可能性を想定しているのか。これらの問いを GBEP 指標に関連づけると、(2)の質問については、GBEP が既に「指標はより効率的なエネルギーの利用と再生可能エネルギーのより広い利用を通じて経済成長を遂げるという国家目標を達成することの一助となる」と回答していることから (GBEP(2011), p13), 本研究では残りの持続可能性の定義と指標での数量化対象に関する2つの問いについて検討する。

初めに持続可能性の定義に関する問いについて、GBEP(2011)では、持続可能な発展について、「環境と開発に関する世界委員会」(通称：ブルントラント委員会)、アジェンダ21、リオ宣言、ヨハネスブルグ実行計画、持続可能な発展委員会 (CSD) を参照しており、「持続可能な発展とは、現世代だけでなく将来世代のニーズも満たすためにもたらされる変化」と定義している (GBEP(2011), p12)。さらに、GBEP(2011)では、指標は「方向性や閾値、限界を示すものではない」と明言している。このことから考えると、GBEP 指標は現在の状況からの変化に着目することでバイオエネルギーの持続可能性を評価するもので、これが(1)の問いに対する回答となる。さらに問い(2)に関しては、閾値を持たない持続可能性の定義は明らかに弱い持続可能性に基づく評価と言える。

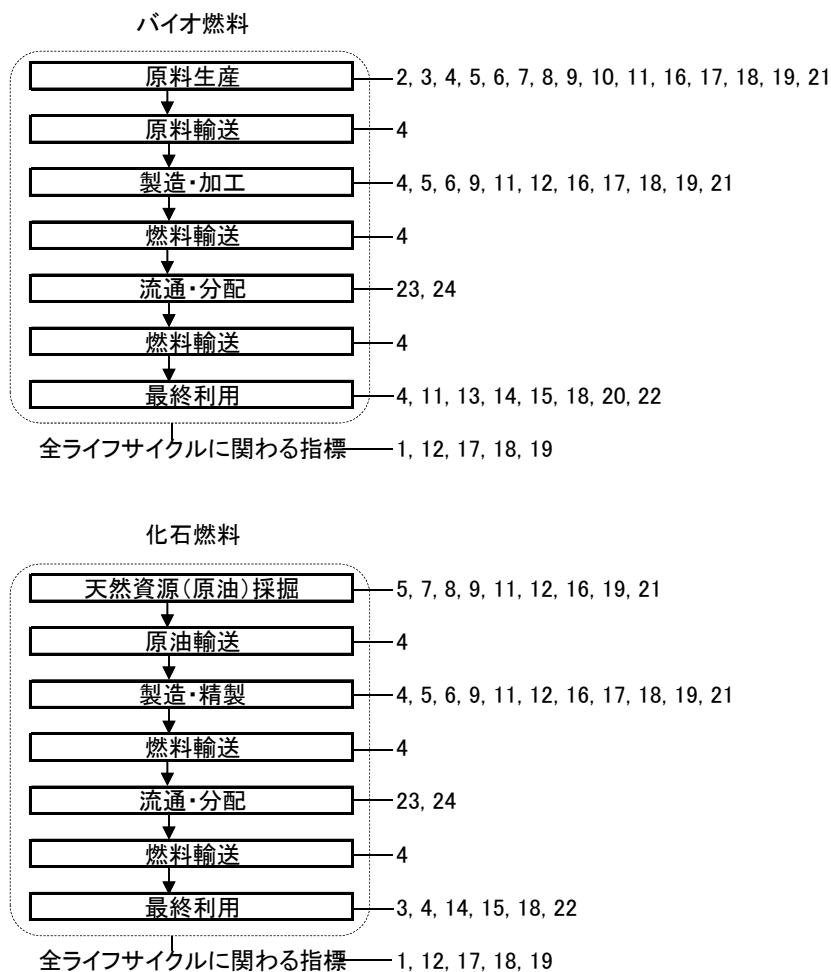
ただし、上記の定義からは指標は「変化前後」を比較して評価すべきだが、必ずしも変化前後の比較を意図して設計されていない。第1表に示されたとおり、各指標は比較対象

を有しており、この比較対象は大きく化石燃料との比較、他のエネルギーとの比較、伝統的バイオマスとの比較、他の農業生産との比較の4つに分けられる。したがって、GBEP指標は特に上記の4つの項目との比較において、バイオエネルギーの導入が国または地域の持続可能な発展に貢献する何らかの変化をもたらすか否かを評価している。変化を基準に持続可能性を評価することは、比較点から持続可能な発展に向かっているのかもしくは持続可能な発展とは逆方向に向かっているのかを把握するのみで、持続可能性の絶対水準は考慮されない。これがGBEP指標の持続可能な発展の数量化に関しての1つの問題点と言える。

次に、上記比較対象の4つの項目の中で、バイオエネルギーは化石燃料の代替エネルギーとして考えられており、特に化石燃料との比較が重視される。バイオエネルギーと化石燃料との持続可能性の比較のためには、そのライフサイクルを把握することが有効である。第2図はバイオエネルギー（バイオ燃料）と化石燃料のライフサイクルを示したもので、さらにGBEP指標がそれぞれのライフサイクルのどの段階に適用されるのかも示されている。前述のとおり、GBEP指標はその全てが化石燃料と比較を想定しているわけではない。例えば、バイオ燃料と化石燃料とのライフサイクルの大きな違いは原料生産と資源採掘の段階である。この2つの異なる段階の比較は容易ではなく、GBEP指標でも原料生産段階は化石燃料との比較ではなく、他の農業生産との比較を意図している。このように、GBEP指標は全体としては化石燃料との比較を想定しながらも、個別の段階ではそれ以外のものとの比較もなされており、GBEP指標が何に対しての持続可能性を評価しているのかが不明確となっている。このことは利用者が評価結果を理解する上での妨げになると思われる。これがもう1つの問題点である。

指標に基づく評価を扱いやすくするため、本研究では何を数量化するのか、何と比較するのかという2つの視点により、GBEP指標を5つのグループに分類した（第2表）。第1のグループ（グループA）は、絶対値を数量化する指標である。ライフサイクル温室効果ガス発生量（指標1）、死傷事故・労災件数（指標16）などがこのグループに含まれる。第2のグループ（グループB）は全バイオエネルギー中、土壌質の維持（指標2）、ILO原則（指標12）など特定の持続可能性条件を満たすものの絶対数または割合を測る指標グループである。第3のグループCは、特定の効果の貢献度を測る指標群で、例えば原料生産への単収増加、廃棄物利用、劣化した土地の活用がどの程度原料生産に貢献しているかを示すもの（指標8）などがある。そして、第4グループ（Dグループ）は、何らかの全体

数に占めるバイオエネルギーの割合を測るもので、例えば全投入量に占めるバイオエネルギーの割合（指標 3）、全汚染物質排出量に占めるバイオエネルギー由来の割合（指標 6）、国の GDP に占める（指標 19）。最後の第 5 グループ（グループ E）はバイオエネルギー生産によってもたらされた変化を計測する指標グループで、例えば所得の増加（指標 11）、近代的バイオエネルギーへのアクセスの増加（指標 14）、化石燃料の代替（指標 20）などがある。



注 表中の番号はGBEP指標の番号を表す。第1表を参照のこと。
 化石燃料のシステム境界はGnansounou et al (2009)による。
 出所 著者作成。

第2図 バイオ燃料と化石燃料のライフサイクル及び関連GBEP指標

第 2 表が示すとおり、何を数量化するのか、何と比較するのかという両視点による指標は広く多様である。このことから、持続可能性の意味するところは各指標の定義に依存し、GBEP 指標の不整合性の原因となっている。

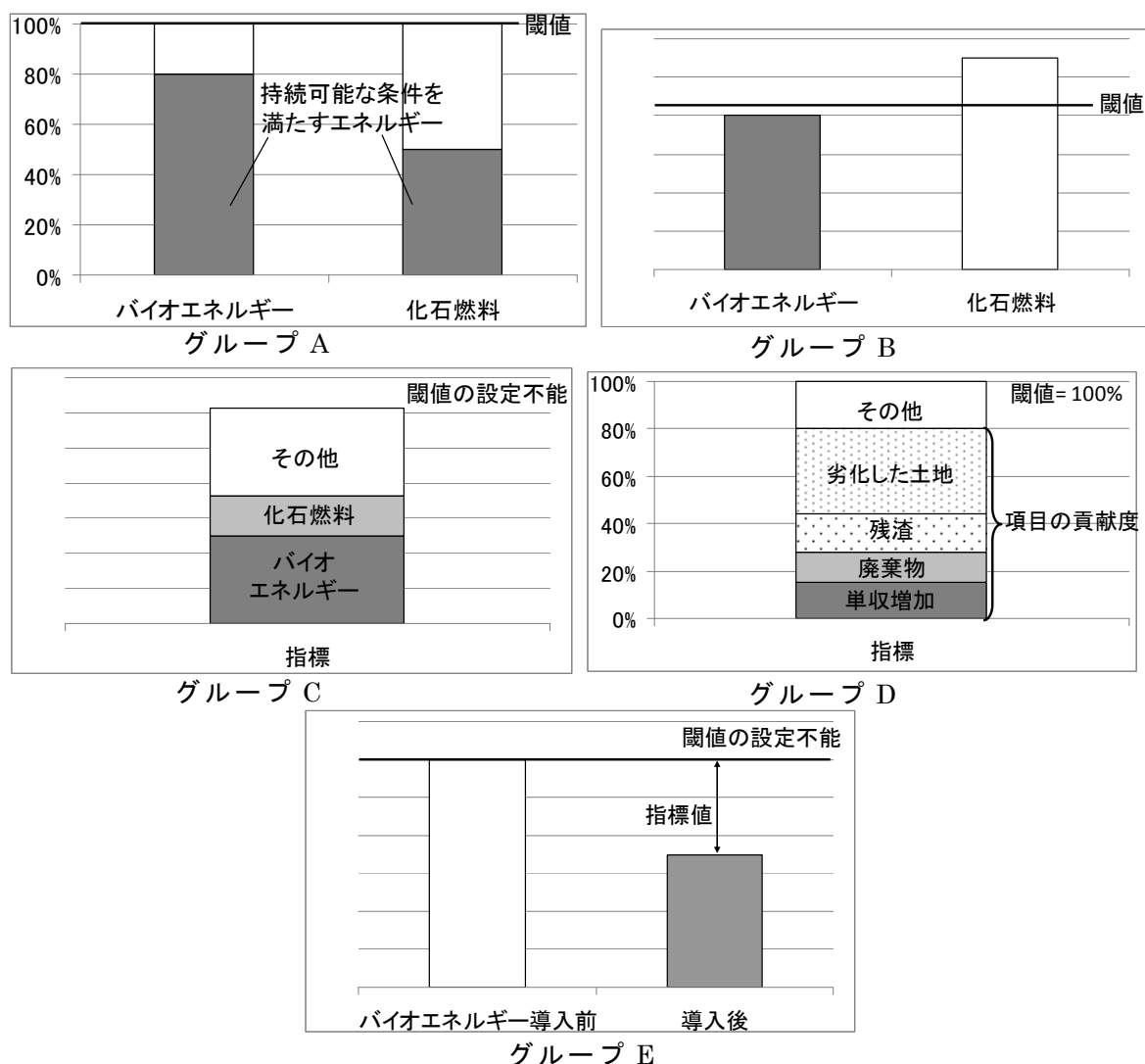
第2表 計測対象と比較対象によるGBEP指標の分類

グループ	定義	化石燃料との比較	他のエネルギーとの比較	他の農業生産との比較	伝統的バイオマス利用との比較
A	絶対値を計測する指標	1, 3, 4, 7, 14, 15, 16, 18, 19, 22, 23	1, 3, 4, 7, 14, 15, 16, 18, 19, 22, 23	17	8
B	全バイオエネルギー中、特定の持続可能性条件を満たすものの絶対数または割合を測る指標	9, 12, 21, 24	9, 12, 21, 24	2	
C	特定の効果の貢献度を測る指標				8
D	何らかの全体数に占めるバイオエネルギーの割合を測る指標	3, 5, 7, 9, 19, 23	3, 5, 7, 9, 19, 23	6	
E	バイオエネルギー生産によってもたらされた変化を計測する指標	10, 12, 14, 15, 20	10, 12, 14, 15, 20	11	13

注: 表中の番号はGBEP指標の番号を示す。第1表を参照のこと。

さらに、持続可能性を測ろうとする指標はその指標の閾値との比較で結果を表す必要があるが (Liverman et al.(1988), Martinet(2011)), 一部指標は閾値を定義できず、実際に GBEP も GBEP 指標が方向性や閾値, 限界を示すものではないと認めている (GBEP(2011), p11)。第3図は指標と閾値がどのように数量化されるかを第2表の5グループごとに示している。グループ A~C については、閾値を設定するのは比較的容易だが、グループ D, E については指標が直接的に持続可能性と関連しないため閾値の設定は不可能である。例えば、グループ D の指標は、例えば年間総採水量に占めるバイオエネルギー生産での水使用量割合 (指標 5) ある側面について全体数に占めるバイオエネルギー由来の割合を計算しているが、より高いもしくはより低い数値となったところで、「持続可能」と「持続不可能」の間の線引きをすることはできないのである。

このことは、たとえ利用者が GBEP 指標を自身のバイオエネルギー計画に適用したとしても、それが持続可能なかどうかを判断できないことを示す。GBEP 指標は時間的にある特定のバイオエネルギー計画を評価し、それがより持続可能な方向に向かっているかどうかを示すにすぎないのである。その上、GBEP 指標は持続可能性を最終判断する包括的評価手法を有しない。このようなことから、第3節ではより包括的持続可能性を判断できる評価手法を開発する。



第3図 指標の各グループの計測方法及び閾値定義方法（つづき）

3. GBEP 指標に基づく持続可能性評価のための多基準分析

多基準分析（MCA）は GBEP 指標に基づく評価に最も適切かつ有効な手法の 1 つである。MCA は多様な代替的行動を評価する手法で、多角的な評価視点を有し幅広い利害関係者を考慮することができるのが特徴である。この手法は、(1)定量データ、定性データ双方を含む多様なデータセットを取り扱うことができること、(2)共同的計画や意思決定環境の構築に利用しやすいこと、(3)理論的技術的に強固な背景を持ちつつもその仕組みは簡素で直感的であることなどから、基準や指標を構築するのにふさわしい手法と認められている（Mendoza and Prabhu(2003)）。さらには、バイオエネルギー供給システムは、原料や製造技術の選択、流通手段、エネルギー種など多くの複雑性と利害関係者を有することか

ら、MCA はバイオエネルギーに関する意思決定のための重要な要素を分析するのに最も適した手法である (Buchholz et al.(2009a))。

MCA を持続可能性に適用した研究事例は数多く存在する。一部は複数の利害関係者の関与を取り扱ったり (Buchholz et al.(2009a), Elghali et al.(2007), Turksim et al.(2011)), 一部は最も持続可能で最適なバイオエネルギーの選択肢, もしくは少なくとも最悪の選択肢を抽出するために適用したり (Turksim, et al.(2011), Sultana and Kumar(2012)), 一部は指標間の相互関係を解明するために MCA を適用している (Mendoza and Prabhu(2003))。Scott et al.(2012)と Huang et al.(2011)はバイオエネルギー及び再生可能エネルギーへの MCA 適用研究事例をレビューしている。しかしながら, MCA を GBEP 指標に適用した研究事例はこれまで存在しない。したがって, 本研究では GBEP 指標に基づく持続可能性評価手法の開発に MCA を適用する。

このためには, まず指標間の相対的ウェイトを構築しなければならない。Mendoza and Prabhu (2003)の方法に基づき, 本研究では各指標間のウェイトの設定に加重加算方式 (WSM) を適用する。この方法は最も簡単な方法であるが, データ制約・欠落で階層分析法 (AHP) などより複雑な手法を適用することができない場合に有効な手法である。Mendoza and Prabhu (2003)に基づき, 相対的ウェイトは以下の式で表される。

$$w_i = a_i / \sum a_i, \quad (1)$$

ここで, w_i と a_i はそれぞれ指標 i の相対的ウェイトと平均ウェイトを表す。

次に, 指標の集計を行う必要がある。ここでの問題は各指標が異なる単位で数量化されている点であり, 集計のためには標準化が必要となる (Krajnc and Glavic(2005))。本研究では, 標準化を2つの段階を経て行った。第1段階は, 指標をポジティブ指標とネガティブ指標に分類する。ポジティブ指標とは「多ければ多いほど望ましい」性質を持つ指標で, ネガティブ指標は「少なければ少ないほど望ましい」性質の指標である。そして, 本研究では以下の式を用いて標準化を行った。

ポジティブ指標については,

$$I_i^+ = (I_{Ai}^+ - T_i) / (I_{\max i}^+ - T_i) \text{ if } I_{Ai}^+ > T_i, \quad (2)$$

$$I_i^+ = (I_{Ai}^+ - T_i) / T_i \quad \text{if } I_{Ai}^+ \leq T_i, \quad (3)$$

ネガティブ指標については,

$$I_j^- = -(I_{Aj}^- - T_j) / (I_{\max j}^- - T_j) \quad \text{if } I_{Aj}^- > T_j \quad (4)$$

$$I_j^+ = -(I_{Aj}^- - T_j) / T_j \quad \text{if } I_{Aj}^- \leq T_j, \quad (5)$$

である。ここで、 I_i^+ と I_j^- はそれぞれポジティブ指標 i , ネガティブ指標 j の標準化指標である。 T は閾値, 添え字の A は当初の指標値を表す。 $I_{\max i}^+$ と $I_{\max j}^-$ はそれぞれ I_i^+ と I_j^- で理論的に考えられる最大値を表し, 過去のデータ, 法的規制などから設定される。例えば, 環境負荷発生量限度が法律または基準値などで設定されている場合はそれが理論的最大値となる。

この標準化法では, 最も持続可能な結果と最も持続不可能な結果がそれぞれ 1 と -1 で表され, 結果が閾値と一致する場合は 0 となる。

最後に, バイオエネルギーの持続可能性の集計スコア S を計算するのには以下の式を用いる。

$$S = \sum I_i w_i, \quad (6)$$

このスコアをあらゆるバイオエネルギー政策で計算して他の代替政策と比較することにより, 利用者はバイオエネルギー政策が持続可能性を向上させるかもしくはどの政策が最も持続可能なのかを判断することができる。

4. 実際の評価事例への例示的適用

(1) データ

前節で示した手法は単なる理論的な提案でしかないため, ここでは京都市の BDF 製造事業での GBEP 評価事例を用いて実施に開発した手法の適用を行い, 化石燃料との結果の比較を行う。林は京都の BDF 製造事業に対して GBEP 指標の適用結果を公表した (Hayashi(2011))。林の研究では, 24 指標のうち 14 指標を計測しているが, 一部の指標は異なる環境負荷や単位で複数計測されているので, 計測された指標の総数は 40 となっ

ている。本研究では、(1)閾値と理論的最大値が設定できるか、(2)化石燃料（軽油）の結果が計測できるかという2つの基準に基づき、Hayashi (2011)の結果の一部を抽出して利用することとする。その結果、14指標のうち8指標（ポジティブ指標2、ネガティブ指標6）を採用した（第3表）。標準化の際には、原稿もしくは過去の法規制・基準値、既存研究の結果に基づき、閾値と理論的最大値を設定した。

第3表 選択した指標と標準化の結果

No	指標	正負 (1)	単位	閾値	最大値	最小値	結果数値
BDF	環境 1 MJあたり温室効果ガス排出量	負	g CO ₂ eq/MJ	46.1	0	92.2	11.7
	4NO _x NO _x 排出量	負	g/GJ	1,075	0	1,639	548
	4SO _x SO _x 排出量	負	g/GJ	0.47	0	94	0.09
	社会 11 雇用者への賃金	正	1000 yen/person	4,593	0	41,798	1,556.5
	16 死傷・労災件数	負	Number	0.01	0	0.06	0
	経済 17 製造コスト	負	yen/L-fuel	97.10	0	168.90	134
	19 粗付加価値	正	yen/L-fuel	41.2	0	137.9	4.4
	22 エネルギー多様性（ハーフィンダール指数）	負	-	0.83	0	1	0.73
	環境 1 MJあたり温室効果ガス排出量	負	g CO ₂ eq/MJ	68.6	0	92.2	92.2
	4NO _x NO _x 排出量	負	g/GJ	1,075	0	1,639	323
軽油	4SO _x SO _x 排出量	負	g/GJ	2	0	86	23
	社会 11 雇用者への賃金	正	1000 yen/person	4,593	0	41,798	6,570
	16 死傷・労災件数	負	Number	2.29	0	11.1	0
	経済 17 製造コスト	負	yen/L-fuel	97.10	0	168.90	64
	19 粗付加価値	正	yen/L-fuel	41.2	0	135.2	85
	22 エネルギー多様性（ハーフィンダール指数）	負	-	0.83	0	1	0.86

注(1) 正:ポジティブ指標, 負:ネガティブ指標

第4表 利害関係者のウェイト付け結果

指標	環境			社会		経済			合計
	1	4NO _x	4SO _x	11	16	17	19	22	
バイオエネルギー専門家	8	7	7	9	8	5	5	9	
バイオエネルギー専門家	9	3	3	9	5	6	9	8	
バイオエネルギー専門家	8	7	7	8	7	8	8	8	
GBEPメンバー	8	6	6	4	3	8	5	3	
GBEPメンバー	9	8	8	4	4	8	8	8	
GBEPメンバー	8	8	8	5	5	7	7	8	
経済学者	8	8	8	8	6	9	8	9	
経済学者	9	8	8	5	8	5	6	8	
政策担当者	9	8	8	5	5	5	8	8	
政策担当者	9	8	8	9	9	9	7	7	
平均	8.6	7.7	7.7	5.7	5.7	7.3	7.0	7.3	
標準偏差	0.53	0.76	0.76	1.98	2.14	1.70	1.15	1.98	
相対的ウェイト	0.15	0.14	0.14	0.10	0.10	0.13	0.12	0.13	1.00

注 評価スコア 1:ほとんど重要ではない, 2:あまり重要ではない, 3:それほど重要ではない, 5:普通, 7:少し重要, 8:とても重要, 9:きわめて重要. この他, 4:それほど重要ではないと6:ほんの少し重要も設定した。

相対的ウェイトを計算する際には、GBEP 指標に詳しいバイオエネルギー専門家 3 名、GBEP メンバー3 名、経済学者 2 名、政策担当者 2 名の合計 10 名にそれぞれが考える各指標の重要度をランク付けするよう依頼し、回答してもらった。ランク付けの回答は第 4

表に示した。

(2) 結果

分析の結果は第5表に掲げた。各指標の最終スコアが0よりも大きい場合には、その項目が閾値との比較で持続可能であることを示す。同様に、各ピラー（環境、社会、経済）の平均最終スコアは各ピラーが持続可能か否かを示し、最終総スコアは評価された BDF が全体として持続可能かどうかを示す。ただし、本研究ではウェイトを設定する際にランキング法を採用しているため、スコアの絶対値は意味を持たず、計算されたスコアは全て序数的なものであることに留意いただきたい。つまり、2 というスコアは 1 というスコアよりも2倍持続可能ということにはならないのである。

第5表 評価結果

No		持続可能性 (1)	標準化スコア	相対的 ウェイト	最終スコア	平均スコア
BDF	1 温室効果ガス量	持続可能	0.75	14.75	11.01	9.38
	4NOx NOx排出量	持続可能	0.49	13.25	6.50	
	4SOx SOx排出量	持続可能	0.80	13.25	10.63	
	11 賃金	持続不可能	-0.08	11.00	-0.90	4.55
	16 死傷・労災件数	持続可能	1.00	10.00	10.00	
	17 製造コスト	持続不可能	-0.51	12.75	-6.47	
	19 粗付加価値	持続不可能	-0.38	12.00	-4.57	-3.15
	22 エネルギー多様性	持続可能	0.12	13.00	1.57	
合計		最終総スコア			27.78	
軽油	1 温室効果ガス量	持続不可能	-1.00	14.75	-14.73	-2.89
	4NOx NOx排出量	持続可能	0.70	13.25	9.28	
	4SOx SOx排出量	持続不可能	-0.24	13.25	-3.22	
	11 賃金	持続可能	0.05	11.00	0.58	5.29
	16 死傷・労災件数	持続可能	1.00	10.00	10.00	
	17 製造コスト	持続可能	0.34	12.75	4.29	
	19 粗付加価値	持続可能	0.47	12.00	5.61	2.53
	22 エネルギー多様性	持続不可能	-0.18	13.00	-2.30	
合計		最終総スコア			9.51	

注 (1) 標準化スコアが0以上で持続可能, 0未満で持続不可能.

本節の目的は京都事例の持続可能性を分析することではなく、提案した手法の実演を行うことなので、ここでは結果について簡単に触れる程度にとどめておく。京都の BDF 事例については、環境ピラーの全ての指標が持続可能となっているが、軽油については3つの指標のうち2指標（指標1：ライフサイクル温室効果ガス排出量、指標4：SOx 排出量）について持続可能ではないという結果になっている。環境ピラーの平均スコアはそれぞれ 9.38 と -2.89 となっている。特に温室効果ガス排出については軽油の結果が非常に悪くな

っている。一方、社会ピラーについてはそれぞれ 4.55 と 5.29 と、BDF も軽油も良好な結果となっている。経済ピラーに関しては、BDF は製造コスト（指標 17）でスコアが負と良くない結果が出ており、これは BDF の高い製造コストを反映した結果となっている。BDF の経済ピラーの平均スコアは -3.15 と経済的に持続不可能な結果となっている。最後に、BDF の最終総スコアは 27.78 で、軽油は 9.51 となっており、この結果は京都の BDF は全体として軽油よりも持続可能であることを示している。京都での BDF 製造事業は環境ピラー、で持続可能性を達成しているものの、経済ピラーではまだ達成されていないことがわかる。このことから、京都の場合、政策担当者は BDF の持続可能性向上のため、製造コストの低減など経済性をより高めることが求められていると結論づけることができる。

（３）限界

本研究で提案した手法は政策担当者がバイオエネルギーの持続可能性を向上させるために非常に有用なツールであるが、いくつかの限界も残されている。ここではその限界について言及する。第 1 に、いくつかの指標について閾値と理論的最大値が設定できないという問題である。本研究で適用した標準化手法は各指標で閾値と予想される最大値を設定することが求められる。しかしながら、第 2 表のグループ D、E の指標では閾値を設定することができず、これらの指標の評価結果は本研究で開発した包括的評価手法に反映させることができないのである。これらの指標を考慮するためには、新たな標準化手法を検討しなければならない。第 2 の限界は、閾値と理論的最大値の設定に追加的な統計・情報が必要ということである。現在のところ、バイオマスやバイオエネルギーに関して体系的に整備された統計を有する国は少なく、多くの国では農業や石油産業などに比べると、限られた統計・情報しか有していない。それ故、本研究でもさまざまなデータ源から必要な統計・情報を引用しなければならず、多くの労力と時間を費やした。この問題は本研究に限らず、バイオマスやバイオエネルギーに関する全ての分析に当てはまることである。この問題の解決には、あらゆる目的に簡便に統計・情報が利用できるようバイオマス統計を整備することが必要であろう。第 3 の課題は、MCA の適用に関してである。Buchholz et al (2009a) は、異なる 4 つの MCA 手法を適用し、結果の大きな差異が生じたと結論づけている。また、本研究で適用した手法は最も簡便な方法の 1 つであり、評価手法から提供される情報も限られる。AHP などより複雑な手法は一対比較の一貫性やある指標が他よりどのくらい

重要かなど、より多くの情報を提供することができる。この問題は必要となるデータと手法から提供される情報のトレードオフの問題とも見なされるが、より複雑な手法を適用すると、政策担当者が利用しにくくなるという問題も生じるだろう。

5. 考察と結論

GBEP 指標の公表までに 3 年以上の年月が費やされた。GBEP の指標開発タスクフォースのメンバーは国の政策担当者や国際機関担当者のみならず、バイオエネルギーの専門家、経済学者、物理学者などで構成され、利害関係者の幅広い意見が反映された。それ故、GBEP 指標は Buchholz et al (2009b)で提案された指標と多くの類似性を有し、このことは GBEP 指標が利害関係者の意見を反映するという意味でよく議論された指標であることを示している。

第 2 節で示したとおり、GBEP 指標は弱い持続可能性を評価するものである。しかしながら、GBEP 指標そのものでは、現行のバイオエネルギーが持続可能なのはどうかについて結論を得ることができないことも示した。その理由の 1 つが GBEP 指標は「何を数量化するか」について一貫していないことである。本研究では第 2 表で指標を 5 つのグループに分け一部の指標が閾値の設定ができないことを示した。指標から明確に持続可能性を判断できるよう、例えば指標 5 の年間総採水量に占めるバイオエネルギー生産での水使用量割合など、いくつかの指標は改訂して一貫性のなさをなくすべきと考える。第 2 の理由は GBEP 指標が各指標の結果を集計できる包括的評価手法を持たないことである。GBEP 指標が持続可能性を最終判断できないという点は政策担当者の指標の利用を妨げることにもなりかねない。GBEP の指標のさらなる有効活用のため、政策担当者が持続可能性の最終判断ができるよう包括的評価手法を導入することが必要である。

GBEP 指標の京都事例の適用結果を利用し、本研究では開発した手法の適用を実演した。この指標を用いることで、京都の BDF が環境ピラーで良好な結果だったものの、経済ピラーであまり良くない結果となったことを示した。このような情報は政策担当者がバイオエネルギー政策を実行する際に有用である。

本研究での手法に基づき、利用者はバイオエネルギーの持続可能性を包括的に評価することができる。利用者がすべきことは、(1)指標の選択、(2)閾値と理論的最大値の設定、(3)各指標のウェイトの設定の 3 つである。一部の GBEP 指標は直接的に持続可能性と関連し

ないため、全ての指標を評価に利用する必要はない。指標の選択は第2表のグループA～Cに限るだけでなく、閾値と理論的最大値の設定が可能かどうかでも判断する必要がある。閾値と理論的最大値の設定は複雑な場合もあるが、現行または過去の規制値や既存研究などもとに設定すべきである。本研究の標準化とウェイトの設定方法は非常にシンプルなので、手法に精通していない利用者でも分析を行うことができる。

しかしながら、バイオエネルギーと化石燃料の各スコアはどちらも同じ範囲で評価されるが（最終総スコアの場合は-100から100まで）、各指標の閾値、理論的最大値などの中身は異なる。そのため、本研究の手法は国家間での比較を行うよりもむしろ一国でのバイオエネルギー政策オプションの検討に利用することが望ましい。この特徴は「指標はより効率的なエネルギーの利用と再生可能エネルギーのより広い利用を通じて経済成長を遂げるという国家目標を達成することの一助となる」というGBEP指標の原則にも整合的である。

謝辞

著者は、2012年OECD共同研究プログラム「持続可能な農業システムのための生物資源管理」の受給者であり、このプログラムによりオランダ・ワーヘニンゲン大学へ赴任し、本研究を遂行した。本プログラムで渡航・研究資金を提供してくださったOECD並びに著者を客員研究員として受け入れてくださったワーヘニンゲン大学に記して感謝の意を表す。

注

(1)本章は、2012年OECD共同研究プログラム「持続可能な農業システムのための生物資源管理」により、著者がオランダ・ワーヘニンゲン大学Ekko C. van Ierland教授及びXueqin Zhu准教授と共同で行った研究成果を和訳の上取りまとめたものである。本稿の分析の詳細はHayashi et al. (2014)を参照のこと。

〔引用文献〕

Barrera-Roldan, A., Saldivar-Valdes, A., (2002) “Proposal and application of a Sustainable Development Index” *Ecological Indicators* 2(3), pp.251-256.

- Buchholz, T., Volk, T.A., Luzadis, V.A. (2009a) "Multi Criteria Analysis for Bioenergy Systems Assessments" *Energy Policy* 37(2), pp.484-495.
- Buchholz, T., Luzadis, V.A., Volk, T.A. (2009b) "Sustainability criteria for bioenergy systems: results from an expert survey" *Journal of Cleaner Production* 17, pp.S86-S96.
- Daly, H. E., Cobb, J. B. Jr. (1990) *For the Common Good Undated and Expanded*, Beacon Press.
- van Dam, J., Junginger, M., Faaji, A., and Fritsche, U. (2008) "Overview of recent developments in sustainable biomass certification" *Biomass and Bioenergy* 32(8), pp749-780.
- Elghali, L., Clift, R., Sinclair, P., Panoutsou, C., Bauen, A. (2007) "Developing a sustainability framework for the assessment of bioenergy systems" *Energy Policy* 35(12), pp.6075-6083.
- GBEP (2011) "The Global Bioenergy Partnership sustainability indicators for bioenergy", available at http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/Indicators/The_GBEP_Sustainability_Indicators_for_Bioenergy_FINAL.pdf
- Gnansounou, E., Dauriat, A., Panichelli, L. (2009) "Life cycle assessment of biofuels: Energy and greenhouse gas balances" *Bioresource Technology* 100(21), pp.4919-4930
- Hayashi, T., (2011) "Piloting study of GBEP indicators in Kyoto, Japan" Presentation of GBEP 1st Working Group on Capacity Building hold at Tokyo in 16 November 2011, available at http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/2011_events/1st_WGCB_Tokyo_16_November_2011/12._Hayashi.pdf
- Hayashi, T., van Ierland, E. C., Zhu, X., (2014) "A holistic sustainability assessment tool for bioenergy using the Global Bioenergy Partnership (GBEP) sustainability indicators" *Biomass and Bioenergy* 66, pp.70-80.
- Hein L., Leemans, R. (2012) "The Impact of first-generation biofuels on the depletion of the global phosphorus reserve" *AMBIO* 41, pp.341-349.
- Holtmark, B. (2010) "Use of wood fuels from boreal forests will create a biofuel carbon debt with a long payback time" *Discussion Papers* 637, Statistics Norway, Research

Department.

- Huang, I. B., Jeffrey Keisler, J., Linkov, I., (2011) "Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends" *Science of the Total Environment*, 409 (19), pp.3578-3594.
- Krajnc, D., Glavic, P., "How to compare companies on relevant dimensions of sustainability" *Ecological Economics* 55 (4), pp.551-563.
- Liverman, D. M., Hanson, M. E., Brown, B. E., Merideth Jr., R. W., (1988) "Forum Global Sustainability: Toward Measurement" *Environment* 12(2), pp.133-143.
- Malovics, G., Csigen, N. N., Kraus, S., (2005) "The role of corporate social responsibility in strong sustainability" *The Journal of Socio-Economics* 37 (3), pp.907-918.
- Martinet, V., (2011) "A characterization of sustainability with indicators" *Journal of Environmental Economics and Management* 61(2), pp.183-197.
- Mendoza, G. A., Prabhu, R. (2003) "Qualitative multi-criteria approaches to assessing indicators of sustainable forest resource management" *Forest Ecology and management* 174(1-3), pp.329-343.
- Scarlet, N., Dallemand, J. (2011) "Recent developments of biofuels/bioenergy sustainability certification: A global overview" *Energy Policy* 39 (3), pp.1630-1646.
- Schubert, R., Blasch, J., "Sustainability standards for bioenergy-A means to reduce climate change risks?" *Energy Policy* 38(6), pp.2797-2805.
- Scott, J. A., Ho, W., Dey, P. K. (2012) "A review of multi-criteria decision-making methods for bioenergy system" *Energy* 42(1), pp.146-156.
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R.A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., and Yu, T. (2008) "Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases through Emission from Land-Use Change" *Science* 319 (29 Feb 2008), pp.1238-1240.
- Sultana, A., Kumar, A. (2012) "Ranking of biomass pellets by integration of economic, environmental and technical factors" *Biomass and Bioenergy* 39, pp.344-355.
- Turcksin, L., Macharis, C., Lebeau, K., Boureima, F., Mierlo, J. V., Bram, S., Ruyck, J. D., Mertens, L., Jossart, J. M., LeenGorissen, L., Pelkmans, L. (2011) "A multi-actor multi-criteria framework to assess the stakeholder support for different biofuel

options: The case of Belgium” Energy Policy 39(1), pp.200-214.