第５章　IRENA との協同によるバイオエネルギー評価ツールの開発

林　岳
國井　大輔
仲田　俊一（再生可能エネルギー機関）※

１．はじめに

近年，再生可能エネルギーの１つであるバイオエネルギーに注目が集まっている。EU では 2009 年に「再生可能エネルギー指令」を公表し，2030 年までに EU 全体の最終エネルギー消費の 20%を再生可能エネルギーで賄うことを目標としている。再生可能エネルギー機関（IRENA）では 2030 年までに再生可能エネルギーに占めるバイオエネルギーの割合が 60%に達すると見ており（IRENA, 2014, p14），バイオエネルギーに対する需要は今後ますます高くなると見込まれる。

しかしながら，バイオエネルギーについては，例えばバイオ燃料の生産拡大が 2008 年頃の食料価格の高騰の一因とされるなど，やみくもな生産増加はさまざまな社会問題，環境問題を引き起こすという認識が広まっている。そのため，バイオエネルギーの利用については，持続可能なものであることが強く求められている。それを目指す動きも世界的に進められており，例えば国連の「万人のための持続可能なエネルギー（SE4ALL）」をはじめ，「国際バイオエネルギー・パートナーシップ（GBEP）」，「持続可能なバイオ燃料円卓会議（RSB）」，「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）」などの機関が国際的なバイオエネルギーの持続可能性確保のためのさまざまな活動を行っている。

また，学術的な分野においても，バイオエネルギーの持続可能性を評価する手法や指標の開発や実際の評価事例などの研究成果は多数存在する。例えば，McBrid et al.(2011)は，環境面での持続可能性について，土壌や生物多様性，温室効果ガス排出量など 19 の指標を用いて評価する手法を提案している。また，Hayashi et al.(2014)は，GBEP の持続可能性指標をもとに，個別の持続可能性評価結果の数値を統合して総合スコアを付するツールを開発している。

このような背景のもと，農林水産政策研究所（以下，政策研）では，IRENA からの要請に応じる形で, 新たな価値プロジェクトにおいて 2013 年から世界各国で適用可能なバイオエネルギーの資源量評価ツール及び資源と技術の選択支援ツールの開発に取り組んでいる。これらのツールは，各国におけるさまざまなバイオエネルギーの利用可能性を評価した上で，その利用形態を踏まえ，原料（バイオマス）種，変換技術などの組み合わせにより，

※ 現国際協力機構

それぞれの持続可能性を評価するものである。本章では，これら IRENA との共同によるバイオエネルギー評価ツール開発の概要を紹介し，ガーナにおけるツールの試行的適用についてその一部を紹介する。

２．IRENA でのプロジェクトと評価ツール開発の経緯

（１）IRENA「バイオマス残渣のエネルギーとしての付加価値化プロジェクト（Valo -BRES）」

アフリカでは，農産物加工部門の規模は非常に大きく，大量の農産廃棄物が発生している。これらの廃棄物は，次世代バイオ燃料，電力，熱などさまざまな形でエネルギー源として利用可能である。一方で，アフリカの国々では慢性的な電力不足に悩まされており，産業界では独自に独立したディーゼル発電機を導入したり，小規模な地域電力供給システムに電力供給を頼っている状況である。これらのエネルギー供給の課題を克服し，環境と経済に便益をもたらす革新的な方法の１つに，農産廃棄物をエネルギー源として利用することで高付加価値化し，農産加工物のバリューチェーンを最大化することがある。このように，アフリカ諸国では，農産廃棄物からのエネルギー供給には明らかに大きな潜在的能力があるものの，政策的なインセンティブがないことや，農産廃棄物の潜在的価値に気づいていないことなどもあり，これまで商業的に実施されているプロジェクトはほとんど見られない。

このような背景から，IRENA ではアフリカ諸国を対象として「バイオマス残渣のエネルギーとしての付加価値化（Valorisation of Biomass Residues as an Energy Source (Valo-BRES)」というプロジェクトを実施している。このプロジェクトは，日本政府の支援のもと，アフリカにおける上記のような状況を改善するため，以下の３点を目的として行われている。

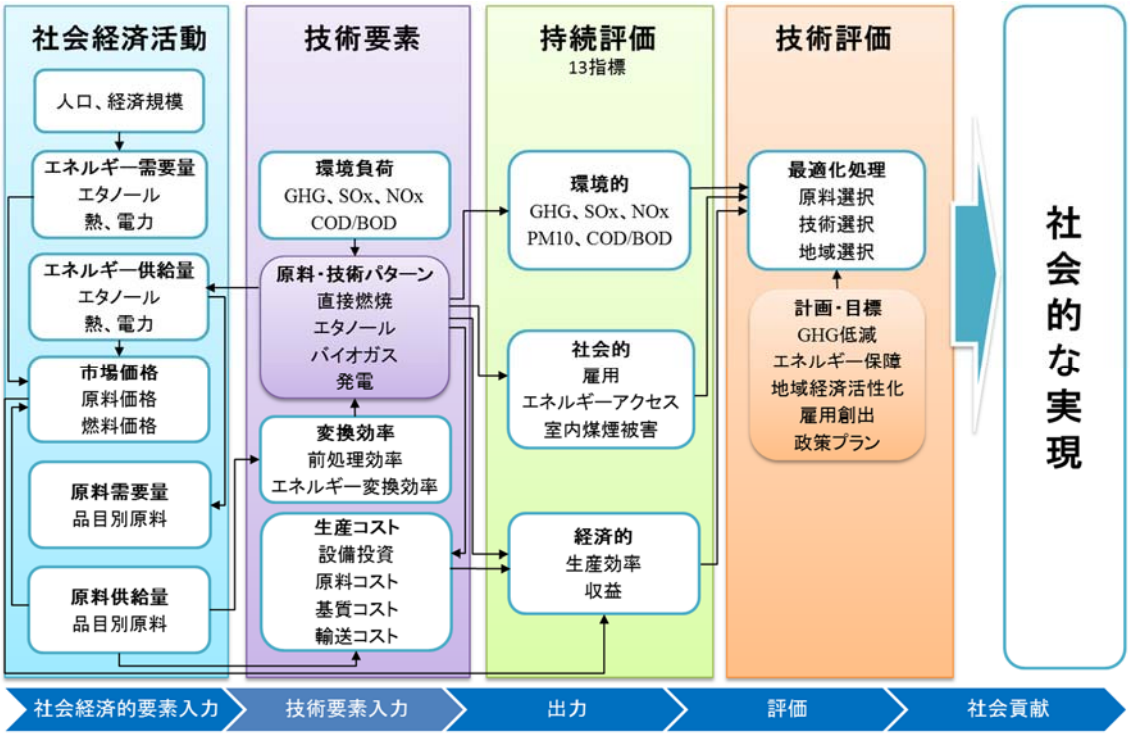
(１)技術的・経済的に最善の方策を導くため，コスト情報など各農産廃棄物種に応じたバイオエネルギー変換技術選択肢の提供

(２)持続可能な農産廃棄物のエネルギー利用に向けた投資を誘発するために，国レベルでの技術選択肢の包括的評価を通じた国レベルの政策的支援・インセンティブの枠組みを構築

(３)現場レベルでのさまざまなプラントの詳細な調査・分析を通じた，バイオエネルギー生産事業者レベルでの投資機会の特定化

プロジェクトは，第１図のような４段階の枠組みになっている。ここにあるとおり，第１段階では，各地域の地域情報を収集することである。これには人口や経済規模といった基礎情報の他，エネルギー価格，バイオマスの価格，バイオマスの供給量・需要量といった情報も収集される。第 2 段階はバイオマスの変換技術に関する情報の収集である。具体的にはエネルギーへの変換効率や生産コストなどの他，温室効果ガス（GHG）排出量や大気汚染物質（SO_2，NO_x，PM など）排出量など環境への影響なども含まれる。第３段階とし

ては，インパクト評価である。これには，国または地域単位での GHG，SO_2，NO_x，PM などの排出量といった環境への影響，雇用，エネルギーアクセス，健康への影響など社会的な影響，そして所得機会といった経済的影響の３側面でバイオエネルギーを利用することによる持続可能性が国または地域単位で評価される。最後の第４段階として，第３段階での結果を踏まえ，どの地域で，どのようなバイオマスを使って，どのような種類のバイオエネルギーに変換すべきなのかについて，目的に応じた最適な選択肢が決定するという仕組みである。



第１図　IRENA Valo-BRES のフレームワーク

出所：IRENA 内部資料をもとに著者作成.

IRENA では，上記のプロジェクトにおける目的達成のため，途上国におけるバイオエネルギー導入支援に向け，それぞれの国おいてどのようなバイオマスを原料として，どのような変換技術を用いて，どの種類のバイオエネルギーを生産するのが経済面，環境面，社会面から総合的に判断して最も適切なのかの情報を提供できるツールを開発することを計画していた。しかしながら，IRENA には未だ学術的な知見や研究蓄積が少ないため，国連食糧農業機関（FAO）など他の国際機関，各国の大学や研究機関にツール開発の協力を依頼した。その一環で政策研にもバイオマス賦存量を評価する資源量評価ツールとバイオエネルギーの持続可能性評価ツールの開発への協力要請があった。また，日本国内では，国際農林水産業研究センター（JIRCAS）に対しても，途上国におけるデータ収集などの面で IRENA 側からの協力要請があった。

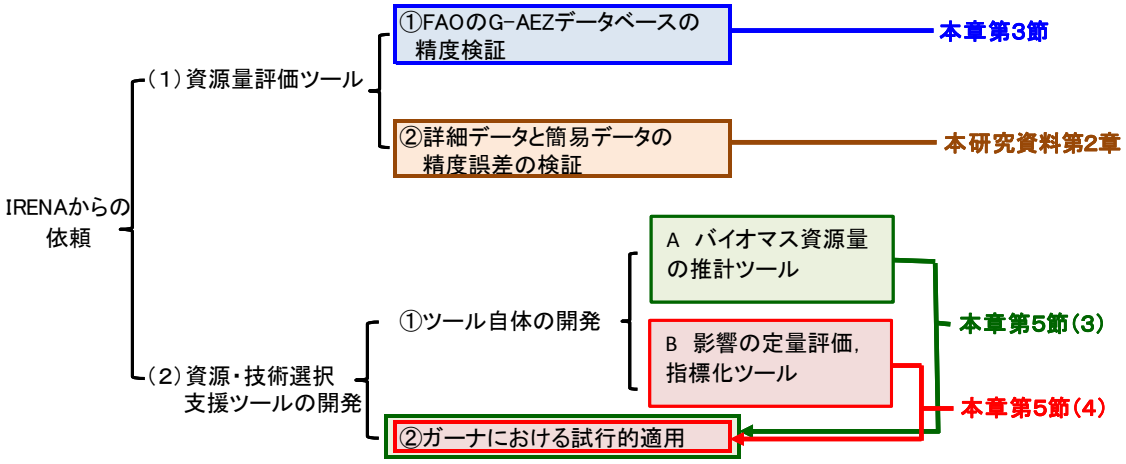
（２）政策研に求められた役割

IRENA から政策研へ依頼があった事項は大きく分けて２つある。第１に，資源量評価ツールの検証である。2013 年に IRENA は，９種類のバイオマス（エネルギー作物，収穫残渣，加工残渣，畜産廃棄物，都市廃棄物，薪，木材伐採残渣，木材加工残渣，木質系廃棄物）について，現在および 2030 年における資源量を評価した（IRENA, 2014）。資源量の評価にあたっては，2030 年における，食料需要，単収，エネルギー需要，農産物生産適地図, 農産物残渣発生係数を主要な入力データとして,「農地は食料生産に優先的に利用され，食料生産後の余剰農地においてのみエネルギー作物が生産される」という仮定のもと試算を行った。しかしながら，この評価の問題点は，主要変数の多くを FAO 食料需給見通し，Global Agro-Ecological Zones（G-AEZ）など外部のデータベースに依存していることであり，それぞれの手法が持つ仮定・前提条件を IRENA 独自の用途に応じて変更することができない点である(1)。この点の改善のため，IRENA では，FAO が開発した G-AEZ のデータを使いつつ，新たに IRENA 独自で GIS を導入し，対象作物の追加・変更，環境保全地域の設定といった各種前提条件の変更が可能な資源量評価手法を構築する計画である。その一部の開発作業について，政策研に協力依頼があった。

第２の依頼事項は，資源・技術選択支援ツールの開発である。IRENA では地域の再生可能エネルギーの資源評価から技術の選定，プロジェクトの構築，バイオマスの提供者とのマッチングや実施プロセスの流れを一体的に支援するツール（ガイドライン，チェックリスト等の集合体）である「プロジェクト・ナビゲータ」を構築している。これまでに風力発電に関する作業を進めてきたが，現在，バイオエネルギーに関する作業を行っているところであり，このバイオエネルギーの「プロジェクト・ナビゲータ」の中心となる資源および技術の選択を支援するツールを開発することが求められていた。この「資源・技術選択支援ツール」は，大きく分けて２つの要素から構成される。第１に農業生産，農地面積，気象条件，人口，GDP，エネルギー統計等の基礎統計および，現地での聞き取り調査の結果を組み合わせることで，利用可能なバイオマス資源量を推計する部分である。第２に，地域に存在する多様なバイオマス資源のうち，利用可能なバイオマスの種類とエネルギー利用技術の組み合わせごとに，経済面・環境面・社会面といった観点から地域に与えるインパクトを定量的に評価し指標化することで，最適な技術の組み合わせの選択を支援するための情報を提供する部分である。第２図に示すとおり，それぞれの依頼事項にはさらに小課題があり，(１)資源量評価ツールの検証には，(１)①FAO の G-AEZ データベースの精度検証，(１)②詳細データと簡易データの精度誤差の検証の２つの小課題が，(２)資源・技術選択支援ツールの開発課題については，(２)①ツール自体の開発，(２)②開発したツールのガーナにおける試行的適用の２つの小課題がある。

政策研では，IRENA 側からの要請に応える形で，(１)①FAO の G-AEZ と現場レベルのデータを用いた場合との比較による G-AEZ の精度の検証，(１)②GIS に簡易データと詳細

データを用いた場合の精度差の検証，(２)①B の影響の定量評価，指標化ツールの開発の３課題を担当した。この後本章第３節においては資源量評価として，G-AEZ の精度検証の結果を紹介する。続いて，第４節では，影響の定量評価・指標化ツールの開発として，(２)①B の手影響の定量評価ツールのフレームワークについて解説する。そして，第５節では資源量評価ツールと影響の定量評価・指標化ツールをガーナにおいて試行的に適用した事例についてその一部を紹介する。なお，ガーナにおける試行については，本原稿の提出期限までに IRENA 側から一部データが入手できなかったため，一部分のみを紹介するにとどめる。また，第２図の(１)②については，岩手県の木質バイオマス発電所を事例として分析を行い，その結果については本研究資料第３章で解説したので，本章ではこの部分は割愛する。



第２図　IRENA からの依頼事項と本研究資料各章・節の関係

３．バイオマス資源量評価

（１）背景

IRENA でのツール開発の実行に際しては，以下の２つの点が重要である。第１に，ベースとなる G-AEZ がどのくらいの精度を有するツールなのかを検証する必要がある。G-AEZ は，FAO により提案された Agro-Ecological Zones（AEZ）をもとにして，FAO と国際応用システム分析研究所（IIASA）により開発された全球規模の潜在作物生産性の推計し 2.5 度のグリッドでマッピングを行うツールである。これは，気候，土壌などの条件に基づき，潜在的な作物生産量を計算するものであり，現在 G-AEZ v 3.0 となっており，ブラウザーベースでの利用が可能となっている。ここで利用されている諸データは，第１表に示すように，全球をベースとして作成されているものである。また，G-AEZ で利用されている統計データについては，FAO が各国で収集した統計データを利用したツールであるため，実

際の圃場レベルの詳細なデータを用いる場合とはどうしても誤差が生じてしまう。その誤差がどのくらいの水準なのかを検証することは，IRENA においても，G-AEZ を改良した新たなツールの開発に不可欠である。Masutomi et al.(2009)では，G-AEZ のいくつかのパラメータを改良した M-G-AEZ を提案しつつ，アジア地域における水稲生産への気候変動の影響を評価している。また，申他（2011）では M-G-AEZ を利用して世界のトウモロコシ生産性への温暖化の影響を評価するなど，研究レベルでの活用がみられる。けれども，本研究におけるバイオマス資源量評価では，途上国などにおけるツールの利用を目指しているため,インターネットにアクセスできればブラウザー上で利用できる G-AEZ を採用する。

第１表． GAEZver.3.0 における利用データ

項目	データ	引用	備考[注2)]
気象	CRU CL 2.0（10分グリッド[注1)]） CRU TS 2.1（30分グリッド[注1)]） VASClimO（30分グリッド[注1)]）	New(2002) Mitchell(2005) VASCLim Website(www.gpcc.dwd.de)	平均気温，最高・最低気温，日射量，風速，湿度，降雨日数 降水量
気候シナリオ	HadCM3 ECHAM4 CSRIO CGCM2	Hadley Centre, UK Meteorological Office Max-Panck-Institute for Meteorology, Germany Australia's Cmmon wealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia Canadian General Circulation Model	30分グリッド
土壌	HWSD	FAO,IIASA,ISRIC,ISS-CAS,JRC(2009)	Harmonized World Soil Database, 30秒グリッド
標高 傾斜角度 斜面方向	SRTM（緯度60度まで） GTOPO30(北緯60度以北)	CGIAR-CSI(2006), USGS-GTOPO30(2002)	Shuttle Radar Topography Mission, 30秒グリッド
土地被服	GLC2000 land cover IFPRI Agricultural Extent database The Global Forest Resources Assessment 2000 and 2005 GMIA ver.4.01 IUCN-WCMC protected areas inventory Spatial population density inventory	JRC(2006) IFPRI(2002), USGS(online) FRA(2000) and FRA(2005) Siebert(2007) FAO-SDRN	30秒グリッド 30秒グリッド 30秒グリッド Digital Global Map of Irrigated Areas, 5分グリッド 30秒グリッド 30秒グリッド
保護地域	WDPA 2009 Natura 2000	WDPA(online) The European Union	The World Database of Protected Area Annual Release 2009, 30秒グリッド 100mグリッド
国・地域境界	GAUL	FAO	The Global Administrative Unit Layers

注：地球を完全な球と仮定し，赤道直下の地球の円周を40,000kmとすると，角度単位1度あたりは約111kmとなる。
1度は60分なので，1分は1.85kmとなる。つまり，10分＝18.5km，30分は55.5kmとなる。
実際には，地球は完全な球体ではないために，赤道直下から離れるほどこの値からずれが生じる。

注１．備考は，データに記載されている内容や，データの仕様を表している．
注２．地球を完全な球と仮定し，赤道直下の地球の円周を 40,000km とすると，角度単位 1 度あたりは約 111km となる． 1 度は 60 分なので，1 分は 1.85km となる.つまり，10 分＝18.5km，30 分は 55.5km となる．実際には，地球は完全な球体ではないために，赤道直下から離れるほどこの値からずれが生じる．

第２に，GIS を用いて資源量を評価する場合，途上国でも得られる様な簡易的なデータを使う場合と，詳細なデータを使う場合とでは，結果にどの程度の誤差が生じるかの検証である。田中他（2012）では，G-AEZ の北海道への適応に関して分析に際して，M-G-AEZ に対して気温条件の変更，バイオマス量計算論理の変更，LAI 算出法の変更，出穂日推定論理の追加，障害型冷害推定論理の追加などを行っている。田中他（2012）の結果では，北海道においてほぼ全域で G-AEZ の低温条件を満たさずに収量がゼロになる結果となっ

たが，改良を加えることで大幅に改善されたとしている。このような事例は，他の地域や他のバイオマス種でも生じる可能性がある。ただし，IRENA で開発する資源量評価ツールにおいて，詳細なデータを利用しようとしても，それが得られる国は限られ，特にツールを必要とする途上国の多くは詳細なデータが得られない可能性が高い。このような状況を踏まえると，途上国におけるデータ制約を考慮し，まずは G-AEZ を採用することをベースとして，G-AEZ の精度に関する検証を行い，その他の簡易データと詳細データの比較検証をする必要がある。そこで本節では，岩手県を対象として，G-AEZ の精度検証を行い，バイオマス資源量評価ツールに利用する際の注意点などを整理することを目的とする。また，上述の簡易データと詳細データの比較については，第３章の第３節を参照されたい。

（２）日本における再生可能エネルギー賦存量に関する既存研究

G-AEZ の分析を行う前に，まずは日本における再生可能エネルギーおよびバイオマス資源量の賦存量のマッピングについて整理を行った。日本では，全国規模の資源賦存量データは，農林水産省の「自然エネルギー賦存量図」，新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「バイオマス賦存量・有効利用量の推計（以下，バイオマス賦存量推計とする）」，永続地帯研究会の「エネルギー永続地帯」などがある。

「自然エネルギー賦存量図」は，農林水産省がグリーンエナジー計画として実施した大規模研究プロジェクト「農林水産業における自然エネルギーの効率的利用技術に関する複合研究」の成果の一環として作成された。５km メッシュのデータで全国を網羅し，月ごとに日射量，風力，水力の３つの自然エネルギーの賦存量を推計している。ただし，バイオマスについては推計されておらず，推計から既に 20 年以上が経過しており，データ更新などはなされていない。

「バイオマス賦存量推計」は，NEDO が地球温暖化対策，循環型社会構築に寄与するバイオエネルギー利活用を促進することを目的に，各種バイオマスの資源量等に関するデータ公表を行うことを目的として作成された。バイオマス種ごとの地域賦存量を算出・把握し俯瞰的なデータとして構築されている。また，当該データは，NEDO のホームページにて公開されている（NEDO, online）。ここでは，2005 年よりデータ公開を開始し，2011 年に更新されている。データは市町村単位での推計および 1 km メッシュでの推計を全国で行っている。対象とするバイオマス種は，木質系，農業系，畜産系，食品系，汚泥系と多岐にわたっており，実際の市町村におけるバイオマス賦存量の推計に利用されている。

「エネルギー永続地帯」は，永続地帯研究会により提唱されており，2008 年から日本国内の市町村単位でエネルギー永続地帯を公表している（永続地帯研究会, online）。永続地帯研究会は, 千葉大学倉阪教授の研究グループと NPO 法人環境エネルギー政策研究所による共同研究組織として 2005 年に発足し, エネルギー永続地帯指標の試算と公表を行っている。エネルギー永続地帯（sustainable zone）とは,「その区域で得られる再生可能エネルギーと食糧によって，その区域におけるエネルギー需要と食糧需要のすべてを賄うことがで

きる区域」と定義されている（千葉大学倉阪研究室・環境エネルギー政策研究所，2013）。対象とするエネルギー源を電力と熱に分け，電力は太陽光，風力，地熱，小推力，バイオマスの 5 つ，熱に関しては太陽熱，地中熱，温泉熱，バイオマスを自然エネルギーとして定義し推計している。当該データは，市町村ごとにエネルギー需要と自然エネルギー供給量を推計し，両者の関係でエネルギー永続地帯か否かを判断している。ただし，市町村単位での推計であるために，さらに細かなメッシュデータとしての利用はできない。

以上の 3 つのデータから，特に IRENA と共同で行っているバイオマス賦存量推計ツールに参考になりそうなものが，NEDO によるバイオマス賦存量推計であるため，以下でさらに詳しく説明を行う。当該データの特徴としては，市町村単位と 1 km メッシュ単位の両方で推計値が公開されていることと，市町村単位では 6 系 26 種，1 km メッシュでは 5 種と多岐にわたるバイオマスを対象としている点である。市町村単位の推計では，バイオマスを未利用系資源と廃棄物系資源に分け，それらをそれぞれ，木質系バイオマス，農業残渣，草本系バイオマスと，木質系バイオマス，家畜ふん尿・汚泥，食品系バイオマスに分けている。それら 6 つの系に対して林地残材，稲わら，ササなどのバイオマス種計 26 種を当てはめている。1 km メッシュ単位での推計では，森林成長量，稲わら，もみ殻，ササ，ススキの 5 つのバイオマス種を対象としている。各バイオマス賦存量の推計は井内（2004）を参照されたいが，市町村単位の木質系バイオマスおよび 1 km メッシュ単位の森林成長量の推計について，簡単に紹介する。まず，森林バイオマスの賦存量は下式(１)にてあらわされる。

市町村別賦存量(DW-t/yr) =都道府県別賦存量(DW-t/yr)×（市町村別森林面積(m^2)÷都道府県別森林面積(m^2)）・・・(１)

その結果を，GIS の各市町村ポリゴンに入力することで，全国のマッピングを行っている。また，計算に用いる林地残材率や立木係数，体積密度などは全国一律の値を文献値から引用している。また，有効利用可能量の推計は，集材範囲として「市町村別林道延長(m)×集材距離(50m と仮定)(m)」を設定し，下式(２)により推計する。

市町村別有効利用可能量(DW-t/yr) =市町村別賦存量(DW-t/yr)×(市町村別林道延長(m)×集材距離(m)/市町村別森林面積(m^2))・・・(２)

つまり，森林面積に対する林道の占有率を賦存量に乗じることで推計している。なお，農業残渣などにおいても，同様の考え方により推計が行われている。次に，1 km メッシュ単位における森林成長量であるが，これは下式(３)により推計される。

1 km メッシュ別成長量(m^3/yr)= 対象群落の面積(ha)×1ha 当たりの年間成長量(m^3/ha・yr)・・・(３)

これは，５万分の１現存植生図の対象群落の１km メッシュ内の占有率から１km メッシュにおける群落の面積を推計し，そこに各県別の針葉樹と広葉樹の年間成長量の統計値を乗じたものである。稲作残差などについても，同様の考え方により推計されている。

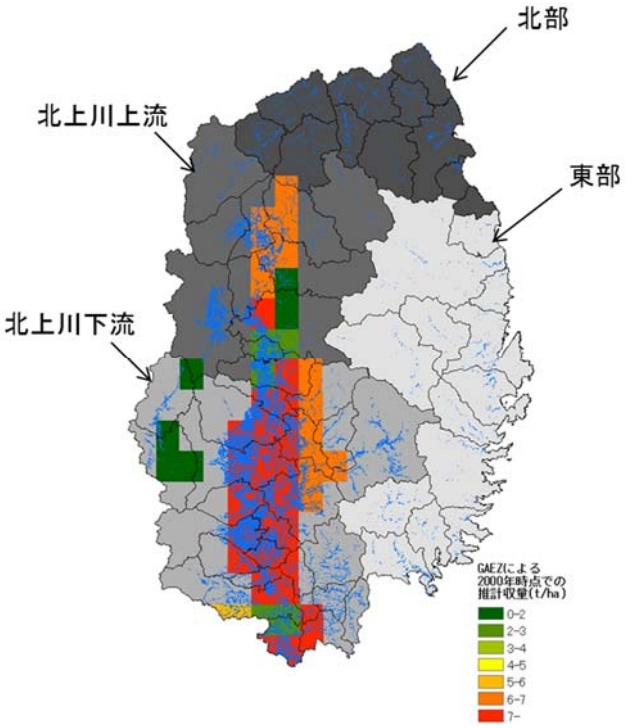
NEDO によるバイオマス賦存量推計は，統一の手法を用いた全国におよぶバイオマス賦存量および有効利用可能量の推計を行っていることから，マクロな視点でのバイオマス賦存量分析にはきわめて有効であると考えられる。一方，いくつかの課題も挙げられる。まず市町村別の推計であるが，賦存量および利用可能量の推計には，市町村別の既存統計値に全国一律の割合を乗じたものである点や，県の統計値を面積按分して用いている点などがあげられる。樹種別の植生の分布などを反映した分析が望まれる。また，１km メッシュ単位の推計は，植生図から１km メッシュあたりの含有率を求めた推計であり，市町村別の推計よりもより実態に即した推計値であると考えられる。けれども，稲わらなどの発生量に関して，全国一律の統計値を利用しており，各地方などの状況に即した値の適用が必要であると考えられる。

以上より，本研究課題であるバイオマス資源量評価においては，バイオマス賦存量推計などの推計方法を参考にしながら，GIS を活用してより実際に即した分析手法の開発が必要となるであろう。

（３）G-AEZ の精度検証

１）分析方法

本研究では，G-AEZ の精度検証を行うため，詳細なデータのあるわが国の水稲収量について，岩手県を対象に分析を行った。分析には，G-AEZ により推計した 2000 年における水稲収量推計値の結果と，2006 年度全国土地利用図（100m メッシュ：国土数値情報ダウンロードサービスよりダウンロード）より抽出した水田分布データ（2006 年度）を利用した。



第３図　岩手県における G-AEZ 分析結果
および土地利用図による水田分布の様子

２）分析結果

その結果を第３図に示す。2.5 度グリッド（岩手県においては東西約 7 km, 南北約 9 km）で表示される G-AEZ の分析結果をみると, 作柄地域の北上川上流と北上川下流の中央部にグリッドが分布しており，特に北上川下流において 2000 年時点での推計収量が 7 t/ha 以上と高くなっていることがわかる（第３図）。一方，土地利用図から抽出した水田の分布では，G-AEZ の結果と同様に北上川上流と北上川下流に多く水田が分布しているが，それ以外の地域においても水田が分布していることがわかる。つまり, 県レベルの分析において，G-AEZ のデータでは，水田の中心的な分布地域は把握できるものの，分布状況を把握することができないと考えられる。

次に，水田面積や収穫量について検証を行った。東北農政局（online）によると，2000 年を 100 とした場合の 2006 年，2015 年の作付面積が 95，90 であり，１ha あたりの収量が 94，101，収穫量が 89，82 であった（第２表）。この増減を踏まえた上で，G-AEZ の推計値（2000 年時点）および土地利用図の推計値（2006 年時点），岩手県の統計値（2015 年時点）について，比較を行った。まず水田面積についてみると，G-AEZ は土地利用図による水田面積の 2.3 倍，2015 年度作付面積の 5.2 倍となった（第３表）。この差は，表４にある 2000 年，2006 年の統計値と比べても，著しく大きな値となった。次に，１ha あたりの収量について比較すると，G-AEZ と 2015 年の統計値はそれぞれ 3.15t/ha と 5.18t/ha であり，２t/ha もの差が生じていた。これは，G-AEZ の分析結果が東部と北部の地域をほとんど含んでいなかったためであると考えられる。以上のように, G-AEZ の精度検証について，まずは県レベルでの検証を行った結果，水田の中心的な分布地域は把握できるものの，収量の予測には適していないことが示された。また，既存の 100m メッシュサイズの土地利用図を利用した場合においても，分布の様子は把握できるものの，面積の把握やそこからの収量予測は困難であると考えられる。

第２表　岩手県における水稲作付け状況（2015 年統計値より）

	作付面積（ha）	増減率	1haあたりの収量（t）	増減率	収穫量（t）	増減率
2000	63,000	100	5.6	100	349,100	100
2006	60,100	95	5.2	94	312,000	89
2015	57,000	90	5.6	101	287,800	82

出所：農林水産省東北農政局(online)

注．増減率の値は、2000 年の各値を 100 とした場合の 2006 年および 2015 年の値.

第３表 G-AEZ と土地利用図および統計値による水田面積，収量，および収穫量の比較

	GAEZ分析結果（2000年時点）			2006年土地利用図		2015年度統計資料		
作柄地域名	水田面積（ha）	平均収量（t/ha）	収穫量（t）	水田面積（ha）	収穫量（t）	2015年度水稲のhaあたりの予想収量（t/ha）	2015年度予想作付面積(ha)	2015年度予想収量（t）
北上川上流	90,506	3.31	1,389,443	31,035	166,657	5.37		
北上川下流	217,500	5.98	431,813	89,448	461,549	5.16		
東部	0	0.00	0	5,105	23,636	4.63		
北部	1,813	0.55	10,880	8,326	39,550	4.75		
岩手県全体	309,819	3.15	1,832,137	133,914	693,672	5.18	57,000	287,800

出所：2015 年度統計資料の数値は，農林水産省東北農政局(online)より集計した．
注．2006 年土地利用図における収穫量は，土地利用図より算出した水田面積に 2015 年の各作柄地域における 1ha あたりの収量 5.2(t/ha)を乗じて求めた．

４．資源・技術選択支援ツールの開発

（１）背景

バイオマスの利用に関する難しさの 1 つはその多様性にある。国や地域ごとに利用できるバイオマスの種類や量が大きく異なることに加え，バイオマス資源をエネルギー変換する技術も熱利用（産業利用，家庭利用），発電（単独燃焼，混焼，CHP），液体燃料（バイオエタノール，バイオディーゼル燃料），ガス（ガス化，メタン発酵）と多岐にわたっている。こうした多様性が，現場レベルでプロジェクトを検討する際に，資源や技術の選択を困難にする要因となっている。このような背景の下，IRENA では途上国でも適用可能な資源・技術選択支援ツールの開発に取り組み，そのフレームワークの開発を政策研に依頼してきた。本節では，バイオエネルギーの導入が地域に与える影響を定量的に評価し指標化する手法を開発した結果を紹介する。

（２）ツールに求められる機能と適用手法の選択

資源・技術選択支援ツール（以下支援ツール）では，バイオエネルギー導入による環境的，社会的，経済的なさまざまな影響を考慮して，対象国または地域において，どのようなバイオマス原料からどのような変換技術を用いてどの種類のバイオエネルギーを供給すべきかの選択の際の指標を与えることを目的としている。その際重要な点は以下の 3 点である。第１に，バイオエネルギーの選択の際の視点で，すなわちどのような観点からバイオエネルギーの選択肢を評価・選択するかである。この評価視点をどのように設定するかによって，最適な選択肢も大きく変わってくる。第２に，さまざまなステークホルダーの主観的な意見を反映した評価/選択であることである。バイオエネルギーは多様なステークホルダーが関与しており，それぞれの立場によって，最適な選択肢も異なる。これら多方

面のステークホルダーの主観的な見解を幅広く反映させた上で最適な選択肢を決定することが重要である。第 3 に，最終的に最適な選択肢を決定するにあたっては，異なる複数の評価視点を定量化・統合化することである。最適なバイオエネルギーの選択肢の評価視点は単一ではなく，複数の視点から多角的に評価することが望ましい。また，評価結果はできるだけ定量化して客観的なかたちで示すことが求められる。そのため，異なる視点からの評価結果を定量化し，かつ比較または統合するため，異なる単位で定量化された結果を標準化し合算できるようにする必要がある。本研究における支援ツールの開発では，このような３点の機能を有することが求められ，これには，多基準分析（MCA）を適用することが有効であると考え，本研究では MCA を用いて支援ツールを開発する。

（３）多基準分析（MCA）の概要と既存研究の整理

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）。MCA を用いることで，例えばバイオガス，バイオ燃料，固形バイオマスなどバイオエネルギー種の選択の複数の代替案について，経済性，雇用への効果，環境への影響など複数の基準を考慮しつつ，最適な代替案を選択することが可能となる。特に，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;Turcksin 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（Turcksin, 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）。また，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。

MCA には，加重総和法（WSM），階層分析法（AHP）や目的達成法（GAM）などいくつかの手法がある。それぞれ代替案の特定化手法が異なるもので，日本では特に AHP の適用事例が多い。AHP はサーティーによって提唱された手法で，複数の代替案について基準ごとに一対比較を行うものである。この手法は問題の分析において，主観的判断とシステムアプローチをうまく組み合わせた問題解決型（提案型）の意思決定法の 1 つである（木下，2000, p.2）。木下（2000）によると，AHP の特長としては，(１)人間の持っている主観

や勘が反映されるようにモデルが作られていること，(２)多くの目的を同時に考慮できるようなモデルであること，(３)あいまいな環境を明確に説明できるようなモデルであること，(４)意思決定者が容易にこのモデルを使えることの４つであると指摘している。

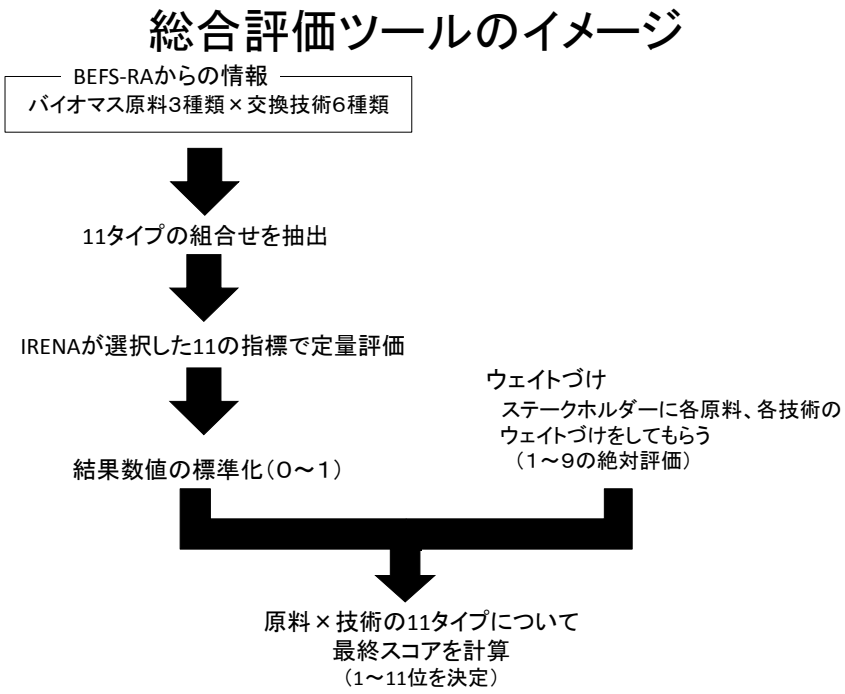
このように MCA には複数の手法が存在するが，Buchholz et al (2009a)は，異なる４つの MCA 手法を適用し，結果の大きな差異が生じたと結論づけており，適用する手法によって結果が変わることも指摘されている。

（４）評価フレームワーク

支援ツールでは，IRENA が選択した 13 の持続可能性指標による評価結果を統合化し，最終的にどのような原料をどのようなバイオエネルギーに変換するのが最も持続可能なのかをスコア化して評価し，最適な資源・技術の選択を明らかにする。

IRENA 側では，FAO の BEFS-RA というバイオエネルギーに関するデータベースを活用したいという意向があり, これに対応するため, BEFS-RA にある 3 種類の原料（Agricultural residue, Energy crops, Wood resources）を 7 つの技術（Charcoal, Briquette, Biogas, Gasification, Vegetable oil, Combustion, Liquid Fuel）で変換する場合を想定してモデルを構築する。この場合，想定される原料と技術の組み合わせは農産廃棄物が 6 技術，資源作物が 1 技術，木質資源が 4 技術の合計 11 通りの組み合わせがあり，この 11 通りの組み合わせに対してスコア付けするツールとなる。

ここでは MCA の手法のうち，加重総和法（WSM）を用いる。WSM は MCA の中でも最も単純な手法であり，MCA に精通していない者でも比較的容易に理解が可能なので，専門家だけでなく，政策担当者などにも活用の幅が広がると考え，WSM を基本としたフレームワークを構築することにした。支援ツールは WSM を応用してウェイト付けして，評価の手順は以下のとおりである（第４図）。



第４図　支援ツールのイメージ

①適用可能な指標の抽出

IRENA で，評価に適用する 13 指標を取り上げているので，各原料・変換技術の持続可能性をこれら 13 指標で評価する。

②評価結果の標準化

①で算出された評価値は指標ごとに全く異なる単位の数値で表されているので，この単位を統一し，一定の範囲内（０～１）の値に変換する。

③ウェイト付け

①で抽出した指標にウェイトを付ける。ステークホルダーにそれぞれの指標の重要性を示したウェイト付けをしてもらう。

④原料，技術，燃料ごとの選択肢の評価

標準化された評価結果とウェイトを乗じ，原料，技術，燃料のカテゴリーごとのそれぞれ選択肢のウェイト付け標準化スコアを推計する。

⑤最終スコアの推計

11 通りの組み合わせについて，ウェイト付け標準化スコアを乗じて組み合わせごとの最終スコアを推計する。

算出された結果を用いて原料×技術の組み合わせに対して順位付けができる仕組みである。

５．ガーナにおける資源・技術選択支援ツールの試行的適用

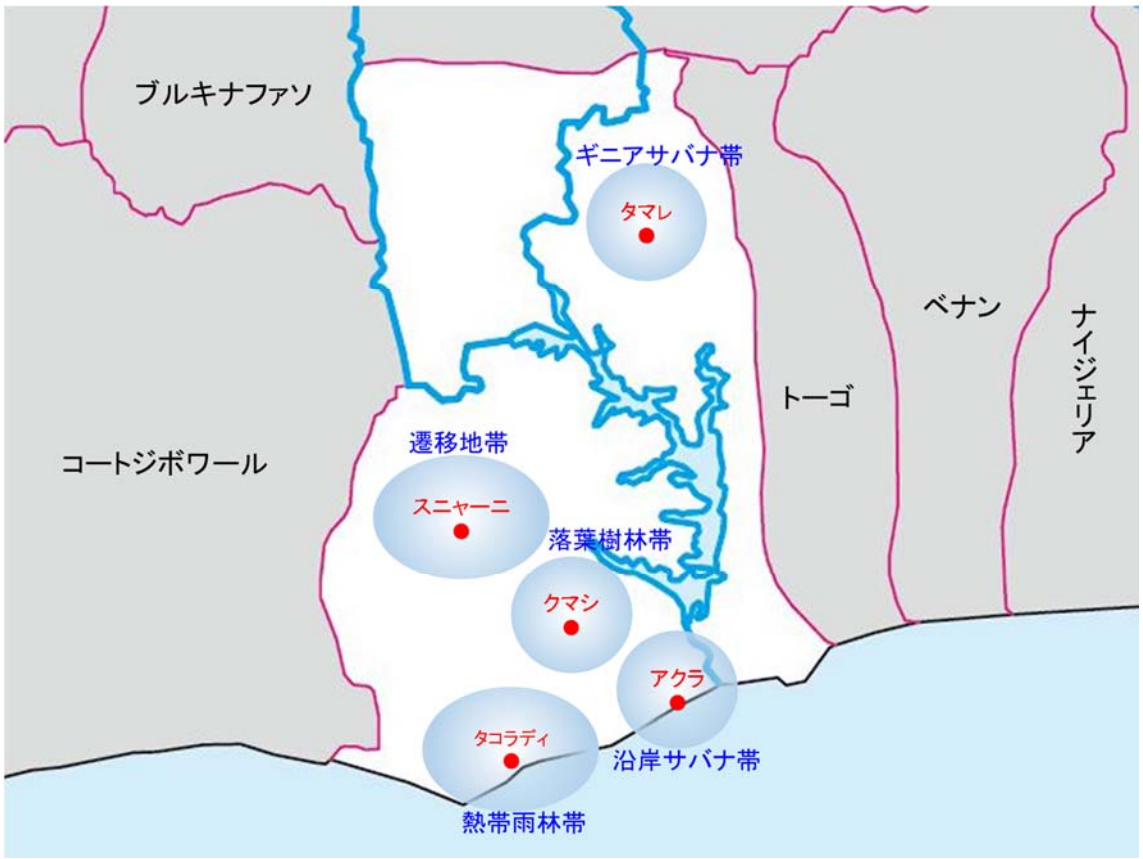
（１）はじめに

本節では，前節までに紹介した資源・技術選択支援ツールをガーナにおいて試行的適用した結果を報告する。IRENA では JIRCAS の協力のもと，西アフリカ４か国（ナイジェリア，カメルーン，セネガル，ガーナ）を対象とした試行的適用を検討していたが，この中でガーナのみを対象としたのは，以下の 4 点の理由による。第 1 に，ガーナでは他の対象国に比べても農産加工業が盛んであり，農産廃棄物の発生量が多く，バイオエネルギーへの利用可能性も高いことである。第 2 に，調査実施予定時期の 2015 年頃に周辺国でエボラ出血熱が発生し，他の対象国では現地調査が困難になったためである。第３に，JIRCAS のアフリカ連絡拠点がガーナの首都アクラにあり，現地情報を収集しやすい環境にあったことである。さらに，第４の理由として，現地の公用語が英語であり，質問票の現地語への翻訳や現地調査時の通訳雇用が不要であったことである。

（２）対象国・地域の概要

ガーナは西アフリカに位置する人口約 2600 万人，面積 23 万 9000km^2 の国である。主要農産物はチョコレートの原料となるカカオである。ガーナにおけるエネルギー状況について，ガーナでは現在電化率はおよそ 70%で農村部を中心に未だ系統電力が整備されていない地域が残っている。特に人口密度が低い北部の農村地帯においては，電化率が低く，この地域の電化率は 35%程度に留まっている（国際協力機構ガーナ事務所，2012）。このため，ガーナ政府は，2020 年までに電化率を 100％とする政策目標を掲げ，また総発電量の 10％を再生可能エネルギーで担うことを目標としている。これらの目標のもと，2011 年 11 月には「再生可能エネルギー法」が可決され，再生可能エネルギーに関する各種規制や規範作りをおこなっているとこである。また，地術的な側面では，各国の支援のもとで大規模な太陽光発電や風力発電及び小水力発電の整備が行われている。バイオマスについては，ガーナの 1 次エネルギー供給に占める伝統的エネルギー(2)の割合は約 70%であり，一方で最終エネルギー消費に占める電力の割合は６％に満たない（国際協力機構ガーナ事務所，2012）。ガーナには熱帯雨林地帯もあり，平均気温が高いなど気候的条件も良好な条件であることから，国内の木材資源のエネルギーとしての潜在的能力は非常に高い。しかしながら，これら伝統的バイオエネルギーの利用は，室内煤煙による健康問題やバイオマスの収集にかかる女性・児童労働の問題などの各種社会問題をもたらしているほか，特に木質系バイオエネルギーは森林破壊を引き起こしており，持続可能なバイオマス資源の利用が特に重要な課題となっている。国際協力機構ガーナ事務所（2012）によると，ガーナにおける近代的バイオエネルギーの導入に関しては，木材加工残渣や籾殻からの発電，ヒマワリ油のディーゼル発電機での使用が検討されているが，いずれも実験・計画段階であり，

実用化には至っていない。



第５図　質問票配布地域の位置と生態的特徴

（３）バイオマス資源の需給バランス評価

１）バイオマス資源量と需要の分布の特定

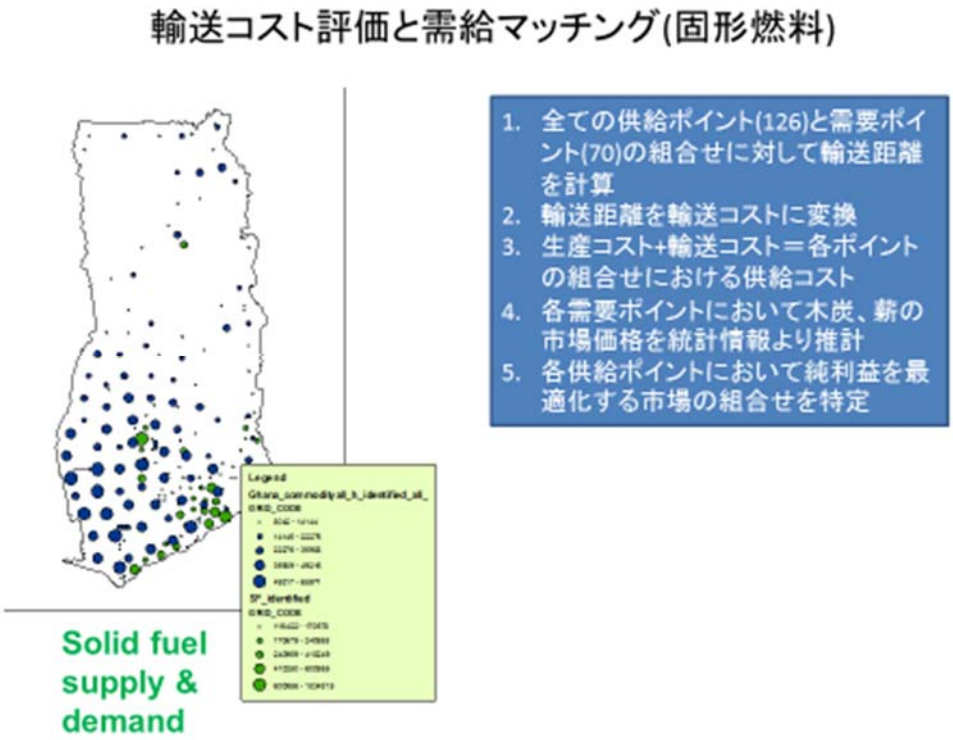
資源・技術選択支援ツールの構築において最も基礎となるデータはバイオマス資源の地理的分布である。研究開始時の構想としては，対象国において農産加工事業者の一覧を作成し，この中からサンプリング調査によって地域毎のバイオマス資源量，需給バランス等を評価して基礎データとして活用することを想定していた。しかし現場でのデータ収集は多大な時間と労力を要し，国の全体像を短期間で把握するには必ずしも適当な手法ではないと判断されるに至った。このため方針を変更し，国レベルまたは地域レベルでの農業生産統計を基本的なデータとし，これにG- AEZの作物別生産的地図を掛け合わせることで，地域毎の主要農産物の生産分布図の代替として利用することとした。これによって農産廃棄物によるバイオマス資源量の８km×８km メッシュの国内分布図が作成された。バイオエネルギーの原料となるバイオマス種はカカオ殻，パーム房殻，とうもろこし芯，ピーナツ殻の４種類，バイオエネルギー種としては固形燃料（ペレット）とバイオマスからの小規模発電による電力の２種類である。

次にバイオマスのエネルギー利用形態（固形燃料，小規模発電施設）によってエネルギー変換のために必要なバイオマス量が異なるため，上記で作成した資源分布図を利用し，エネルギー形態毎に設置可能なプラント数，プラントの場所（供給ポイント）を推計した。このプラント数，場所の特定には，それぞれの原料からペレットを作る大規模ペレット工場運営に必要なバイオマス量を年間 1000 トンとし，小規模発電施設の運営に必要なバイオマス量を年間 2500 トンと仮定して，半径 12km 以内でこの量のバイオマスを確保できる地点とした。

次に需給バランスを評価するため，ガーナ政府の取りまとめたエネルギー統計から都市部，農村部における１人当たりの炭および薪の消費量を得た。これにガーナの人口密度分布図を掛け合わせることで２km×２km メッシュの地域毎の家庭用固形燃料の消費量分布図を作成し，これをエネルギー需要分布とした。なお，電力需要については時間の都合上今回は分析を行わなかった。そして，作成された固形燃料需要図に基づいて，半径 20km 以内の固形燃料需要が高い地点を選定し，ガーナ国内で需要の高いポイントを上位 70 か所選定した。

２）輸送コストを勘案した需給バランスの評価

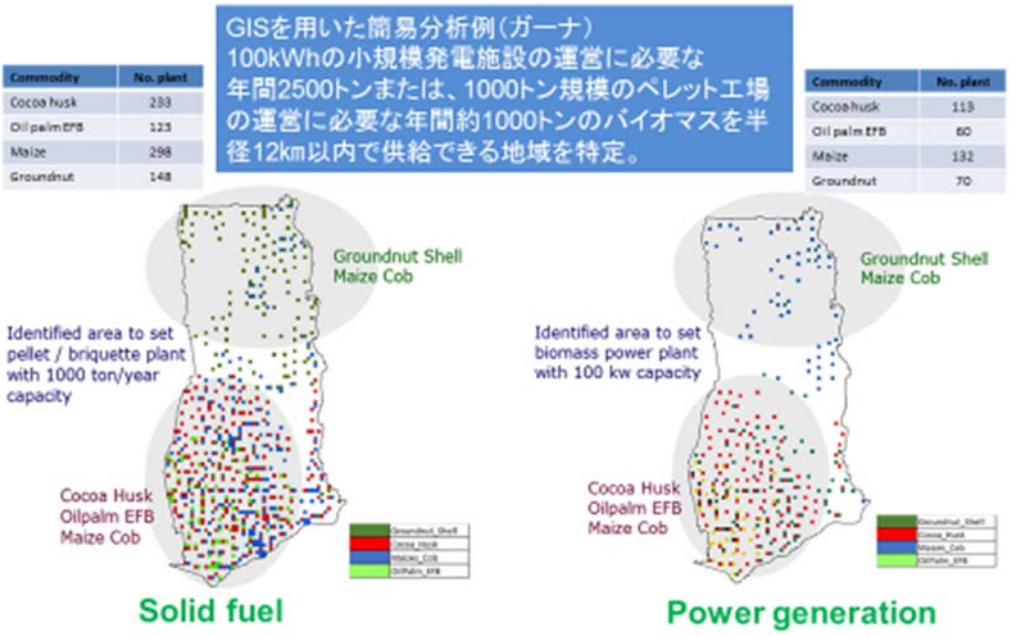
これまでの分析で，バイオマスの供給ポイント（産地），需要ポイント（市場）がそれぞれ特定されている。ここでは固形燃料のみを対象として，それぞれの供給ポイントにおいて純利益が最大となる産地と市場の組合せを特定するため，すべての供給－需要ポイントの組合せに対して輸送距離に基づいた輸送コストを算定し，別途 FAO のツールを利用したペレット製造コストを加えることで固形燃料の供給コストを推計した。また，ガーナのエネルギー統計から地域毎の固形燃料価格を入手し，各需要ポイントにおける薪・炭の販売価格を推計した。供給量，供給コスト，需要量，市場価格の４つの数字に基づき，純利益を最大にする産地－市場の組合せを検討した（第６図）。さらに，それぞれの組み合わせに対して，各ポイント間で競合による価格競争が一切発生せず，市場の需要，価格，距離に応じて最適な販売先の組み合わせを選択できると仮定し，それぞれの供給ポイントごとの純利益を比較した。



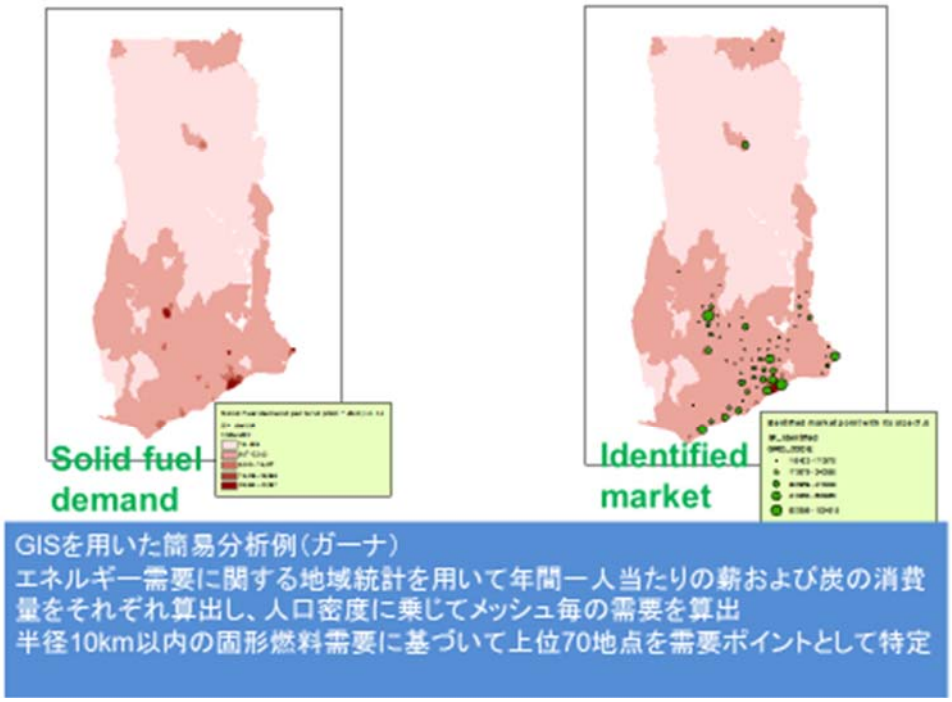
第６図　輸送コスト評価と需給マッチング

３）評価結果

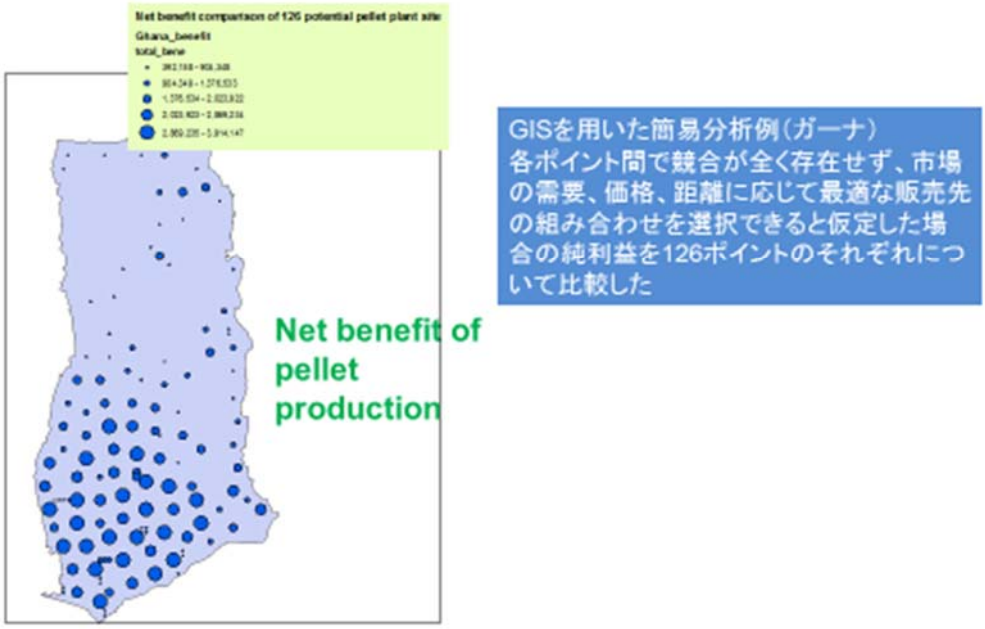
第７図には，バイオマスの供給ポイントが示されている。固形燃料について，その原料別にみると，とうもろこし芯を原料とするプラントの設置可能数が 298 と最も多く，次いでカカオ殻の 233，パーム房殻の 198 となっている。一方，電力の場合は，固形燃料に比べて設置可能なプラント数が大幅に少なくなる。この理由としては，発電の場合はより多くのバイオマス原料を収集しなければならないためである。地理的な分布を見ると，固形燃料として利用する場合，北部の内陸部ではピーナツ殻ととうもろこし芯が有望なバイオマスとなり，中部・南部地域ではカカオ殻，パーム房殻，とうもろこし芯が有望であることが示された。これを第８図のエネルギー需要ポイントと合わせて見ると，固形燃料，電力ともエネルギーの需要地は中部から南部沿岸地域に集中しており，北部のエネルギー需要は多くないことがわかる。第９図には各供給ポイントの純利益が示されている。これを見ると，南部の沿岸地域とくに南西部において利益が高くなる傾向が示されている。これは，南西部には原料へのアクセス性と需要地へのアクセス性双方の利点があるためと考えられる。



第７図　バイオマス供給ポイントの特定



第８図　バイオマス需要ポイントの特定



第９図　市場配分を最適化した場合における各供給ポイントにおける純利益の比較

４）まとめ

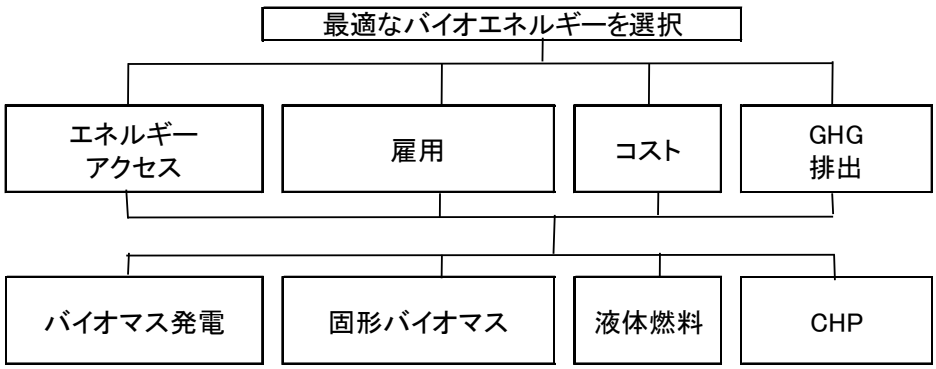
国レベル／地方レベルの生産統計と G-AEZ を組み合わせることでバイオマスの地理的分布を簡易に推計することができた。これを同様の手法で推計したバイオマス需要と組み合わせることで輸送コストを推計し,純利益を最大化する産地／市場の組合せを特定した。ガーナへの適用事例では，北部ではピーナツ殻が，南部ではカカオ殻，パーム房殻などがバイオエネルギーの原料として有望である一方，エネルギー需要が高いのは南部であり，バイオエネルギープラントの純利益が高くなるのは原料バイオマスと需要地双方へのアクセス性が高い南西部であることが示された。

（４）支援ツールの試行的適用

１）概要

ガーナでの試行的適用に際して，支援ツールはガーナのバイオエネルギー利用の実情に応じて改変されている。具体的には，まず指標を当初の 11 指標から，ガーナでのデータ収集可能性や将来のバイオエネルギー導入政策などを鑑み，エネルギーアクセス，雇用，費用，GHG 排出量の 4 指標に絞った。このことにより，指標が大幅に削減され，MCA の中でも指標同士の一対比較が可能となったことから，ウェイト付けには上記絶対評価法では

なく，一対比較を行う階層分析法（AHP）を採用した。次に，バイオエネルギーについては，これも現地のバイオエネルギー利用状況を鑑み，バイオマス発電，固形バイオマス，液体燃料，電熱併給の 4 タイプを設定し，階層構造を第 10 図のとおりとした。



第 10 図　バイオエネルギー選択の階層構造

本研究における試行的評価では，ガーナにおけるバイオエネルギーの導入について，ステークホルダーとしてバイオエネルギー関係者に質問票を配布し，各指標のウェイトを回答してもらっている。質問票の配布地域とその生態的特徴については，第 5 図に示したとおりである。質問票の配布は沿岸部地域から内陸地域にわたる 5 地域で実施され，それぞれが生態的特徴により分類される。また，ステークホルダーとしての具体的なバイオエネルギー関係者とは，国家政策担当者，地方政府政策担当者，研究者・専門家，工場経営者・管理者，原料供給・流通業者，原料製造者・農家，その他の 7 種を想定した。

ウェイトの推計に必要なステークホルダーへの一対比較実施は，IRENA が現地のコンサルタントに依頼し，第 4 表のとおり 5 つの生態ゾーンで合計 65 人のステークホルダーに質問票を配布し，回答してもらった。

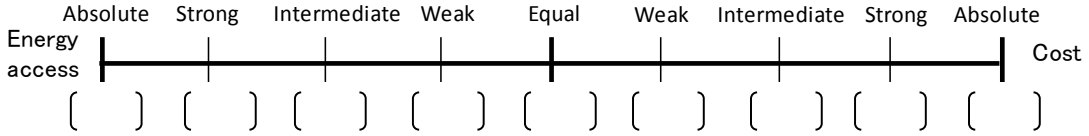
配布した質問票には，回答者がどのような属性のステークホルダーかを回答してもらった後，それぞれの指標間の重要性を一対比較で回答してもらった。一対比較は第 11 図のとおり，例えばエネルギーアクセスと雇用の指標の間で「絶対的にエネルギーアクセスが重要」から「どちらも同程度」，さらに「絶対的に費用が重要」までを 9 段階の中から選択肢を回答してもらう方式を採った。さらに，バイオエネルギー種についても，各指標の観点からみて，あるバイオエネルギーともう 1 つのバイオエネルギーはどちらがどれだけ重要かを尋ねた。例えば「エネルギーアクセスの観点から見て，バイオマス発電と固形バイオマスはどちらがどの程度重要か」を質問し，指標間一対比較と同様の 9 段階で回答してもらった。

第４表　質問票配布地域の概要

生態地域	地域の特徴	主要産物	バイオエネルギー原料として見込まれるもの	代表都市	サンプル概数
沿岸サバナ地帯	沿岸地域	漁業	とうもろこし葉茎	アクラ	5
熱帯雨林地帯	森林，プランテーション	カカオ（ココア）	木材加工残渣（枝葉），キャッサバ皮，とうもろこし葉茎，パーム残渣	タコラディ	2
落葉樹林地帯	森林，プランテーション	カカオ（ココア）	木材加工残渣（枝葉），キャッサバ皮，とうもろこし葉茎，パーム残渣	クマシ	32
遷移地帯	落葉樹林からサバナへの遷移地帯	カカオ（ココア），キャッサバ	キャッサバ皮，とうもろこし葉茎	スニャーニ	10
ギニアサバナ地帯	サバナ	トウモロコシ，ソルガム，キビ，塊茎（ホドイモ），ササゲ	ソルガム茎，キビ茎，とうもろこし葉茎	タマレ	16
				合計	65

2. Please select which of these two factors is more important, and how the factor is important than the other.

2-2 Of the two criteria “Energy access” and “Cost”, which is more important with respect to sustainable bioenergy and how much more?



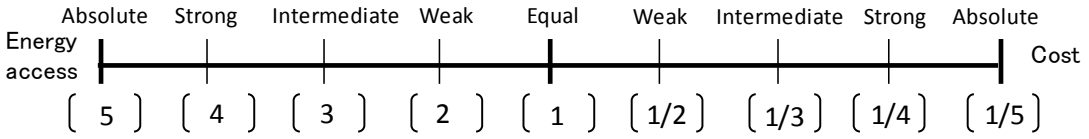
第 11 図　一対比較の質問例

今回の質問票では，４つ指標と４つのバイオエネルギー種があるので，指標の一対比較で６回（＝４×３÷２），指標ごとのバイオエネルギー種同士の一対比較が６回×４指標の 24 回，合計 30 回の一対比較を回答者にしてもらったことになる。回答者にとってはかなりの負担かもしれないが，木下（2000）によると，AHP では最大で７要素までが望ましいとしており，本研究における４指標，４バイオエネルギー種での AHP 適用は問題ないものと考えている。

２）AHP による数量化手法

AHP ではステークホルダーに回答してもらった各指標の重要比較結果を数値化する。上記第７図の例で示すと，一対比較の「どちらも等しく重要（Equal）」の回答を１，「エネルギーアクセスが若干重要（Weak）」という回答を２とし，順に「ほどほど重要（Intermediate）」を３，「かなり重要（Strong）」を４，「非常に重要（Absolute）」を５とする。逆にコストのほうがより重要とした回答は上記の逆数として，「コストが若干重要（Weak）」から「非常

に重要（Absolute)」までを順に 1/2，1/3，1/4，　1/5 とする（第 12 図)。



第 12 図　回答の数量化

これと同様に他のての一対比較の回答結果も数量化し，これを第５表のような表形式に表して各列の数値の和を計算する。この表では a_{12} から a_{34} までの６つの数値を上記第 12 図から転載し，その逆数を対角要素に入力するだけでよい。続いて，計算された列和で各数値を除して比率を計算する。これにより，各指標の相対化が行われ，算出した数値の列和は１となる（第６表)。そして，この第６表の数値の行ごとの平均がそれぞれの指標のウェイトとなる。

このようなウェイトの算出方法は最も簡便な方法であり,他にも AHP によるウェイトの算出方法はいくつか存在する。今回最も簡便な方法を採用したのは，WSM と同様，IRENA スタッフや現地の政策担当者でも利用できるように，なるべく高度な専門的知識を必要としない手法となることを心がけたためである。

第５表　回答数値の行列化と列和の算出

		質問票の左側の項目			
		Energy access	Labour opportunity	Cost	GHG emission
質問票の右側の項目	Energy access	1	a_{12}	a_{13}	a_{14}
	Labour opportunity	$1/a_{12}$	1	a_{23}	a_{24}
	Cost	$1/a_{13}$	$1/a_{23}$	1	a_{34}
	GHG emission	$1/a_{14}$	$1/a_{24}$	$1/a_{34}$	1
	列和	Σa_1	Σa_2	Σa_3	Σa_4

出所：木下（2000）をもとに著者作成.

第６表　回答数値の相対化

	Energy access	Labour opportunity	Cost	GHG emission	ウェイト（＝行平均）
Energy access	$1/\Sigma a_1$	$(1/a_{12})/\Sigma a_2$	$(1/a_{13})/\Sigma a_3$	$(1/a_{14})/\Sigma a_4$	w_e
Labour opportunity	$a_{12}/\Sigma a_1$	$1/\Sigma a_2$	$(1/a_{23})/\Sigma a_3$	$(1/a_{24})/\Sigma a_4$	w_l
Cost	$a_{13}/\Sigma a_1$	$a_{23}/\Sigma a_2$	$1/\Sigma a_3$	$(1/a_{34})/\Sigma a_4$	w_c
GHG emission	$a_{14}/\Sigma a_1$	$a_{24}/\Sigma a_2$	$a_{34}/\Sigma a_3$	$1/\Sigma a_4$	w_g
列和	1.00	1.00	1.00	1.00	

$w_e=\{1/\Sigma a_1+(1/a_{12})/\Sigma a_2+(1/a_{13})/\Sigma a_3+(1/a_{14})/\Sigma a_4\}/4$
$w_l=\{a_{12}/\Sigma a_1+1/\Sigma a_2+(1/a_{23})/\Sigma a_3+(1/a_{24})/\Sigma a_4\}/4$
$w_c=\{a_{13}/\Sigma a_1+a_{23}/\Sigma a_2+1/\Sigma a_3+(1/a_{34})/\Sigma a_4\}/4$
$w_g=\{a_{14}/\Sigma a_1+a_{24}/\Sigma a_2+a_{34}/\Sigma a_3+1/\Sigma a_4\}/4$
出所：木下（2000）をもとに著者作成.

同様の計算方法で，エネルギーアクセス，雇用，コスト，GHG 排出のそれぞれの観点から見たバイオエネルギー種４種のウェイト w_1～w_4 を導出する。そして最終的なウェイト W，すなわち統合されたスコアは，以下の行列式で表される。

$$\mathrm{W}=\begin{pmatrix} w_{1e} & w_{1l} & w_{1c} & w_{1g} \\ w_{2e} & w_{2l} & w_{2c} & w_{2g} \\ w_{3e} & w_{3l} & w_{3c} & w_{3g} \\ w_{4e} & w_{4l} & w_{4c} & w_{4g} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} w_l \\ w_e \\ w_c \\ w_g \end{pmatrix}$$

ここで，添え字の１～４　は各バイオエネルギー種を，添え字の *e, l, c, g* はそれぞれエネルギーアクセス，雇用，コスト，GHG 排出の観点から見ていることを示す。これにより，それぞれの指標の観点から見た各種バイオエネルギーのウェイトと，指標自体のウェイトの双方を考慮したスコア付けが可能となり，スコアを見ることでどのバイオエネルギー種が最も望ましいかを判断することができる。

本稿の提出期限までに IRENA 側からアンケート調査の結果が得られなかったため，本稿では試行的適用の結果については言及することができなかった。IRENA との共同研究については, 2016 年度以降も継続する予定であるため, 結果についてはその折に報告したい。

５．おわりに

本章では，IRENA と政策研の共同研究の成果として，バイオマスの資源量評価ツール及び資源・技術選択支援ツールの開発研究について解説し，これらのツールのガーナへの試行的適用に関して，その一部を紹介した。IRENA ではこれらのツールを用いることで，途上国，特に西アフリカ諸国において，持続的で経済的なバイオエネルギーの普及拡大につなげたい考えである。一方で，これらのツールは先進国である日本においても適用可能であり，日本にこれらのツールを適用することで，途上国とは違った視点からバイオエネルギーの評価を行うことができる。また，第３章で取り上げた詳細なデータと簡易データとの結果の差については，日本のような統計データが整備された国や地域でしか実施できな

い貴重な分析であると考える。このような分析から様々な知見を得ることで，途上国における適用に際にも，有用な情報を提供できると考える。

今回のガーナにおける資源量評価ツールの試行的適用では，産地及び市場の地理的分布を特定し，輸送距離に基づいた経済的評価を行った。この手法は輸送コストのみならず，他の指標と組み合わせることで，環境インパクト（GHG 排出量削減）や社会インパクト（エネルギーアクセス，雇用機会の改善）の地理的分布を推計することにも応用できると考えられる。また，支援ツールの試行的適用については，WSM ではなく AHP を用いた一対比較によるフレームワークを適用した。このような手法の有効性が確認されれば，改善を施した上で他国への適用も検討したい。

今後の課題として，資源量評価については，データの質や解像度の違いが結果にどのような違いをもたらすかに関する検証や，距離の測定について２点間の直接距離でなく道路網を勘案した距離に組み替えること，電力需要にも対応すること，他の国への分析範囲拡大などについて，今後取り組む必要がある。また，支援ツールについては，アンケート結果が得られ次第，早急に分析を進めるとともに，WSM と AHP による結果の違いなども今後分析すると興味深い結果が得られるかもしれない。

注

(1) FAO のデータの詳細は FAO（online）を参照のこと。

(2) 伝統エネルギーとは，薪，木炭，農業廃棄物を指す（国際協力機構ガーナ事務所，2012）。

［引用文献］

Buchholz, T., Volk, T.A., Luzadis, V.A., (2009a) “Multi criteria analysis for bioenergy systems assessments” *Energy Policy 37(2)*, pp.484-495.

千葉大学倉阪研究室・環境エネルギー政策研究所（2015）『永続地帯 2014 年度版報告書』。

永続地帯研究会（online）「永続地帯ホームページ」http://sustainable-zone.org/（2016 年 4 月 8 日アクセス）。

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.

FAO(online)”Global Agro-Ecological Zones” http://www.fao.org/nr/gaez/en/(2016 年 4 月 8 日アクセス)。

FAO, IIASA, UNFPA, ISRIC, ISS-CAS, JRC (2009) “Harmonized World Soil Database (version 1.1)”, FAO and IIASA, Rome.

FRA(2005)”Global Forest Resources Assessment 2005 – Progress towards sustainable forest management”.

FRA (2000)”Global Forest Resources Assessment 2000”.

Hayashi, T., (2014) “A holistic sustainability assessment tool for bioenergy using the Global Bioenergy

Partnership (GBEP) sustainability indicators” *Biomass and Bioenergy 66*, pp.70-80.

Huang, I. B., 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.

IRENA (2014) “Global bioenergy supply and demand projections: A working paper for REmap 2030”.

井内正直（2004）「バイオマスエネルギー利用計画支援システムの開発--賦存量データベース及び収集コスト評価モデル」『電力中央研究所研究報告 Y03023』，中央電力研究所。

木下栄蔵（2000）『入門 AHP 決断と合意形成のテクニック』，日科技連出版社。

国際協力機構ガーナ事務所（2012）『ガーナ共和国再生可能エネルギー分野情報収集・確認調査報告書』。

Masutomi, Y., Takahashi, K., Harasawa, H., Matsuoka, Y., (2009) “Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models” *Agriculture, Ecosystems & Environment 131(3-4)*, pp.281-291.

McBride, A. C., Dale, V. H., Baskaran, L. M., Downing, M. E., Eaton, L. M., Efroymson, R. A., Garten C. T. Jr., Kline, K. L., Jager, H. I., Mulholland, P. J., Parish, E. S., Schweizer, P. E., Storey, J. M., (2011) “Indicators to support environmental sustainability of bioenergy systems” *Ecological Indicators 11(5)*, pp.1277-1289.

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.

Mitchell, T. D., P.D. Jones, (2005). “An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high resolution grids” Norwich, UK Climatic Research Unit, School of Environmental Sciences, University of East Anglia.

NEDO（online）「バイオマス賦存量・有効利用可能量の推計」
http://app1.infoc.nedo.go.jp/biomass/index.html（2016 年 4 月 8 日アクセス）。

New, M., Lister.D., Hulme.M., Makin.I, (2002) ”A highresolution data set of surface climate over global land areas” *Climate Research 21*,pp.1-25.

農林水産省（1988）「自然エネルギー資源賦存量図(日射)　(グリーンエナジー計画成果シリーズ　I 系(エネルギーの分布と利用)　No.7)」。

農林水産省（1987）「自然エネルギー資源賦存量図(水力)　(グリーンエナジー計画成果シリーズ　I 系(エネルギーの分布と利用)　No.6)」。

農林水産省（1986）「自然エネルギー資源賦存量図(風力)　(グリーンエナジー計画成果シリーズ　I 系(エネルギーの分布と利用)　No.4)」。

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.

Siebert, S., Döll.P., Feick.S., Hoogeveen.J., Frenken.K. (2007) ”Global Map of Irrigation Areas version 4.0.1.” FAO, Rome.

申龍熙・高橋潔・肘丘靖明・花崎直太・山本隆広・増冨祐司（2011）「気候予測の不確実性を考慮した世界のトウモロコシ生産性の温暖化影響評価」『土木学会論文集 G（環境）』67(5), pp.I_61-I_67。

Sultana, A., Kumar, A., (2012) “Ranking of biomass pellets by integration of economic, environmental and technical factors” *Biomass and Bioenergy 39*, pp.344-355.

田中朱美・高橋潔・申龍熙・増冨祐司・山中康裕・佐藤友徳（2012）「潜在作物生産性モデル GAEZ の北海道での適用可能性の検討と改良」『土木学会論文集 G（環境）』68 (5), pp.I_237-I_248。

東北農政局（online）「平成 27 年度産水稲の作付面積及び予想収穫量（10 月 15 日現在）（東北）」http://www.maff.go.jp/tohoku/stinfo/toukei/kekka27/（2016 年 3 月 7 日アクセス）。

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.

USGS(online) “Global Land Cover Characterization (GLCC) “ https://lta.cr.usgs.gov/GLCC,（2016 年 7 月 29 日アクセス）。

WDPA (online) “World Database of Protected Areas, Annual Release 2009”, http://www.wdpa.org/AnnualRelease.aspx,（2016 年 5 月 18 日現在 2009 年データへのアクセス不可。ただし，上記サイトにて 2014 年のデータダウンロード可能）。