農作物の栽培を想定した 世界のバイオ燃料ポテンシャルの推定

MODELING WORLD BIOENERGY CROP POTENTIAL

萩原健介¹・花崎直太²・鼎信次郎³

Kensuke HAGIWARA, Naota HANASAKI, Shinjiro KANAE

¹学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 学生 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²正会員 工博 国立環境研究所 研究員 (〒305-0051 茨城県つくば市小野川 16-2)

³正会員 工博 東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻 准教授 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

Bioenergy is regarded as clean energy due to its characteristics and expected to be a new support of world energy demand, but there are few integrated assessments of the potential of bioenergy considering sustainable land use. We estimated the global bioenergy potential with an integrated global water resources model, the H08. It can simulate the crop yields on global-scale at a spatial resolution of 0.5×0.5. Seven major crops in the world were considered; namely, maize, sugar beet, sugar cane, soybean, rapeseed, rice, and wheat, of which the first 5 are commonly used to produce biofuel now. Three different land-cover types were chosen as potential area for cultivation of biofuel-producing crop: fallow land, grassland, and portion of forests (excluding areas sensitive for biodiversity such as frontier forest). We attempted to estimate the maximum global bioenergy potential and it was estimated to be 1120EJ. Bioenergy potential depends on land-use limitations for the protection of bio-diversity and security of food. In another condition which assumed more land-use limitations, bioenergy potential was estimated to be 70~233EJ.

Key Words : energy crop, global water resources model:H08, land-use limitation

1. はじめに

バイオ燃料とは、エネルギーや工業原料の資源としてみた生物体量 (バイオマス) のことを指し、バイオ燃料を化学反応させて得られたエネルギーはバイオエネルギーと呼ばれる。バイオ燃料は主に植物から作られ、本研究ではバイオ燃料の原料となる作物のことを『バイオ燃料作物』と呼ぶことにする。バイオ燃料のメリットは大きく分けて3つあり、1つ目は再生可能エネルギーであること。2つ目は二酸化炭素排出削減効果があること。そして3つ目は地球規模で原料が広く分布しており、石油のような「地政学的リスク」を回避できることである¹⁾。2030年の世界の一次消費エネルギーの需要は2007年比で40%増加すると予想され²⁾、加えて将来的な化石燃料の枯渇への懸念や温室効果ガスの排出削減といった関心から、これらのメリットを持つバイオ燃料に多くの期待がかけられた。しかし、バイオ燃料作物の栽培には懸念が伴う。バイオ燃料の生産拡大は、限りある土地・水資源をめぐる食糧との競合、農地拡大に伴う生態系の破壊、水資源

の枯渇といった事態を引き起こす可能性がある³⁾。そのため事態を悪化させないためにも、「バイオ燃料はどの程度、世界のエネルギー需要を満たすことができ、導入に値するのかどうか」という問いに対する答えが早急に求められているが、その研究が十分に行われていないのが現状である⁴⁾。そこで上記の問いに答えるべく、世界の地上でどれほどのバイオ燃料作物が栽培できるかという可能栽培量を算出し、世界のバイオ燃料ポテンシャルを推定することが求められている。

本研究ではバイオ燃料ポテンシャルを『あるバイオマスから得ることのできるエネルギーの物理的な上限』と定義する。従って、バイオ燃料をバイオエタノール等に転換する際の転換効率は含まれない。また本研究では、「この地域はこの作物を植えなければならない」といった政策的側面による土地利用の制約を受けず、『世界中どのような種類の作物の栽培を想定しても良い』と仮定する。このバイオ燃料ポテンシャルの定義は過去の研究においても用いられており⁵⁾、本研究もこの定義を用いることによって過去の結果と比較することができる。本研究

では、作物の収穫部分（実際に食べる部分に相当）と収穫部分以外（以下、残余）の一部をバイオ燃料として利用することを想定しており（後述）、収穫部分と残余を合わせたバイオマスが有しているポテンシャルをバイオ燃料ポテンシャルと表現する。また残余が有しているポテンシャルを残余ポテンシャルと表現する。ポテンシャルを算定対象とした理由であるが、バイオ燃料から得ることのできるエネルギーの上限を求めることができることに加え、バイオ燃料はその利用方法が多岐に及び、エネルギーを得る際の技術レベルには地域差があるためである。これら地域によって様々に変わる要素を各々考慮してバイオ燃料の評価を行うのは非常に困難であるため、ポテンシャルを算定して、バイオ燃料の評価を行う。

従来の研究では、「バイオ燃料作物のための農地面積」と「単位面積あたりに見込める植物の平均的収量」の二つからバイオ燃料ポテンシャルを求めるという推定の方法をとってきた⁵⁾（結果：約 277EJ）。しかし、この方法では「どの場所にどれだけのポテンシャルがあるのか」という空間的な評価に難があり、現在耕作地でない土地にバイオ燃料作物を栽培した場合に、気候条件等の影響を踏まえて、どの程度の収量が得られるのか言及することが困難である。これに対して、全球植物（作物）生長モデルを用いることで空間的解析を行った既存の研究としては Campbell et al. (2008)⁶⁾と WBGU (2008)³⁾がある。食糧との競合が起こりにくいという理由から、Campbell et al.は放棄された農作地・牧草地において、WBGUは耕作地や森林、生態系にとって重要な土地を除いた地域での栽培を想定しており、両者とも持続可能性を考慮して、土地利用の条件を設定している。バイオ燃料作物に関しては、Campbell et al.は特定の作物の作付けを想定せず、自然植生によって得られるバイオマス量を採用し、現在のバイオ燃料ポテンシャルを 32～41EJ と算出し、WBGUは、バイオ燃料作物に生産性の高い牧草とユーカリやポプラなど成熟までの期間が短い木を採用し、現在のバイオ燃料ポテンシャルを 34～120EJ と算出した。これらの結果は現在の一次消費エネルギーの 7.5～25%に相当する。しかし過去の研究の推定値にはまだまだ幅があり、これ

は Campbell et al.⁶⁾や WBGU³⁾がそれぞれ特定の条件下で計算を行っているのが大きな要因である。そのため一つや二つの推定値だけ存在すれば事足りるわけではなく、様々な条件の下での推定値の比較を行い、どの要素が大きな影響を与えているのかを明らかにすることに深い意義がある。また、食料との競合・生態系の保全・水資源について言及し、バイオ燃料の持続可能性を追求するのが我々の最終的な目標であり、そのためには他のチームの結果を待つのではなく、自分たちのツールで計算を始める必要がある。そこで本研究は最終的な目標の第一歩として、独自に設定した条件の下で、我々が開発中である全球統合水資源モデル：H08^{7,8)}を用いて、世界のバイオ燃料ポテンシャルの推定を行うことを目的とする。

2. 手法

(1) 全球統合水資源モデル：H08

全球バイオ燃料ポテンシャルを推定する上で重要な点は「どこでどれだけ得られるのか」という空間的な評価を行うことである。そこで本研究では、空間的評価を可能とするために、全球スケールで自然・人為起源の水循環と作物成長を同時に扱うことのできる、全球統合水資源モデル^{7,8)}（以下、H08）を用いた。H08は陸面過程、河川、作物、貯水池操作、環境用水、取水の6つのサブモデルから構成され、それぞれを組み合わせる（図1は6つのサブモデルを組み合わせる利用した際の概略図である）。このモデルの特徴は、作物成長モデルが組み込まれている点と、土地利用において灌漑農地と非灌漑農地の分割を行っている点である。気象情報と土地利用の情報を与えると、自然の水循環に加えて、貯水池操作や農業・工業・生活などの取水といった人間活動による影響も考慮した水循環を、全球スケールの日単位のタイムステップで計算することができる。H08の数値実験の設定条件は Hanasaki et al. (2010)⁸⁾の結果を利用した。その設定条件を表1にまとめる。

表-1 数値実験の設定条件（Hanasaki et al. (2010) より）

入力データ	Reference
Spatial domain/resolution	Global, 0.5° × 0.5°
Temporal domain/resolution	1980-1999, 6 h
Meteorological forcing	NCC (Ngo-Due et al., 2005)
<i>Land cover</i>	
Albedo	ISLSCP2 (Hall et al., 2006)
Vegetation	Not specified
Soil	Not specified
Cropland	Ramankutty et al. (2008)
Irrigated cropland	Siebert et al. (2008)
Crop type	Monfreda et al. (2008)

図-1 全球統合水資源モデルの6つのサブモデルの概略図

バイオ燃料ポテンシャルを求めるために重要なサブモデルは作物成長モデルで、このモデルは作付け種、作付け開始日、作付け期間中の気象データ、土壌・施肥・管理情報（灌漑の有無）などの入力に対し、収穫日、総生物体量収量、蒸発散量などの出力を $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ の空間解像度で返す。本研究ではこれらの出力の1つである収量データを利用した。また、ポテンシャル量の推定が目的なので、H08 において土壌の栄養不足によるストレスがかからない設定とし、世界中で十分な土壌の栄養があると仮定した。

(2) バイオ燃料作物の選択

先行研究において Campbell et al は自然植生によるバイオマスを、農作物に比べて得られる収量が大きいという理由からバイオ燃料作物として想定している⁹⁾。WBGU は成長の早い2種類の本木と1種類の生産性の高い牧草を植えることを想定している³⁾。しかし、これらは得られるエネルギーが大きいという面から見た場合において理想的だと思われる作物である。バイオ燃料作物を大規模に栽培するとすると、作物の病気・経済的・社会的等の様々な要因が関わるため、実社会において上記の作物がバイオ燃料として選択されるとは限らず、他の作物についても議論の余地がある。そこで本研究では H08 が作物成長を再現可能な作付け種の中で、すでにバイオ燃料として栽培されている作物（アブラナ・サトウキビ・ダイズ・テンサイ・トウモロコシ）に、世界で広く栽培されている作物（コムギ・コメ）を加えた7種類をバイオ燃料作物とした。H08 においてこれら7種の作物の作付けを各グリッドで行い、ポテンシャルを求めるため一番大きい収量が得られる作物がグリッド内に一様に植えられていると仮定した。しかし、すべての陸地から作物の収量が得られるわけではない。H08 の作物成長モデルにおいて、作物がどれだけ成長するかは、主として気温と土壌水分量によって決まるため、土壌水分量が少ない場合、そのぶん収量も少なくなる。そのため、砂漠など水資源に乏しい乾燥地域では、収量はほとんど得られない。

今回はポテンシャルを求めることが目的なので、上記の各作物の、アメリカの収量とアメリカと同じ栽培地での H08 の収量が合うように、H08 の収量の補正を行った。H08 の作物成長モデルは作物の各々に固有のパラメータ群が設定されているが、それらの値は全球で一律となっているため、モデルの出力する収量はこの補正によって、アメリカと同水準、言い換えると先進国と同水準の農業技術を用いた栽培を、それぞれの国の気象条件の元で行った場合の収量と仮定できる。そのため、実際の収量と比較すると発展途上国では収量が大きくなる傾向があることに注意が必要である。水分を多く含むサトウキビとテンサイは、バイオ燃料ポテンシャルを求める際にその影響が無視できないので、乾物収量を用いて補正した。

コメ・コムギ・ダイズ・トウモロコシの収量の補正には USDA, (1994) の統計値を用い、アブラナには FAOSTAT, (1988~92) の統計値を用いた。サトウキビ・テンサイの乾燥収量は Murata, (1981)⁹⁾ の値を用いた。

(3) 残余の利用について

植物の実を取り除いた茎、葉、根などの残余の利用は食料との競合を起こしにくいとされる³⁾。茎、葉、根などの細胞組織はセルロースを主成分とする堅い細胞壁で覆われているため、現段階では残余をバイオエタノール等の液体燃料に転換するのが困難であるが、液体燃料への容易な転換のための研究が盛んに行われており、近い将来、セルロース系由来のバイオ燃料が登場することは十分考えられる。また残余を燃やしてエネルギーを取り出すのであれば、細胞壁の問題は解決できる。一方で収穫後の畑から残余を取り除くことは、土壌の栄養や雨風による浸食の観点から問題であるとの指摘も多く、過去の研究において、残余を20~30%以上取り除いてしまうと風や雨による浸食が起こり25%以上取り除くと土壌の有機物の減少が報告されている¹⁰⁾。そこで本研究では残余の25%だけバイオ燃料に転用することにする。なお、WBGU は地上バイオマスの90%を利用し³⁾、Campbell et al はバイオマスの50%が地上バイオマスと仮定し、その地上バイオマスをバイオ燃料に利用するとしている⁹⁾。

また、十分な土壌の栄養と水が想定できるアメリカのフロリダ州において、WBGU の想定した本木や草の収量と本研究の収量の比較を行うと、WBUG が本木・草ともに45~55 [t/ha] 程度であるのに対して³⁾、本研究が想定した7種の作物うち、残余も含めた収量が最大となる作物では35~50 [t/ha] 程度であるので、収量の違いは1~2割程度であり、栽培作物の違いによる影響はそれほど大きくないといえる。

3. バイオ燃料作物の栽培地

(1) バイオ燃料作物の栽培地の選択

バイオ燃料作物の栽培地の選択にあたって、オーストラリアの Klagenfurt University が作成した全球土地利用データセット（A comprehensive global 5 min resolution land-use data set for the year 2000 consistent with national census data）を用いた。衛星データを用いて、全球の陸地の土地利用を Infrastructure area, Cropland, Forestry, Non-used area, Grazing land の5つに分け、統計値と整合性を合わせた土地利用データである。Non-used area とは、山の頂上や荒地、砂漠、氷床など作物の栽培に適さない地域や人間の手が及んでいない地域であり、Grazing land はその他の4つの土地利用に含まれない土地である。これらの各土地利用についてバイオ燃料作物の栽培地になり得るかどうかを検討することで、地球上すべての土地について言及

することができる。Infrastructure area と Non-used area には栽培不可なので残る 3 つの土地利用について考える。まずは Cropland であるが、食糧との土地利用の競合を防ぐために、バイオ燃料作物の栽培は行わない。ただし休耕地はバイオ燃料の栽培地として利用可能で、Cropland から得られる残余もその 25% だけバイオ燃料として利用できるとした。Grazing land については、放牧との土地利用の競合を防ぐために牧草地は除き、残る草地で栽培する。Forestry に関しては、生態系保護のため原生林や保護区を除き、残った森林の一部をジャトロファなどのバイオ燃料用植物の栽培地に転用する。以上より (i) 休耕地 (ii) 牧草地を除いた草地 (iii) 生態系保護のため原生林や保護区を除いた森林の一部、をバイオ燃料作物の栽培地とした。それぞれの栽培地について順を追って説明してゆく。なお、以下に登場する各土地利用データの対象年度が一致していないが、その影響は無視できる程度である。

(2) 休耕地

農地の面積に関する各国のデータは FAOSTAT が公開しており、休耕地の面積は 'fallow land' で表される。しかし、すべての国において休耕地の土地面積を公開しているわけではなく、世界中の休耕地面積のデータが得られない。そこで川島 (2008) の中の『FAOSTAT が同じく公開している、耕作地面積 (arable land) と収穫面積 (harvested area) の差を便宜上休耕地とする』¹¹⁾ という算定法を用いて休耕地の面積を求めることにした。二期作を行っている国の場合、収穫面積はその分増加するので、Döll and Siebert (2002)¹²⁾ の「世界の 19 地域における作付け回数」を用いて個別に求めた。表 2 はその具体的な作付け回数である。収穫面積を作付け回数で割ることによって、一回作付けした際の収穫面積を求めることができ、求めた一回分の収穫面積を arable land の面積から引いて休耕

地の面積を求めた。その際、休耕地面積が負となった国は除外した。収穫面積と農地面積のデータは FAOSTAT の 2007 年のものを用いた。

今回本研究が算定した 2007 年の休耕地の面積と、FAO が休耕地面積 'fallow land' を公開している国に関して、その面積の比較を行うと (公開されているデータが限られているため、比較年度が合わない場合があるが、数年で休耕地が倍以上変わることには無いと思われるので、その影響は無視できるとした)、アメリカでは、本研究が 7355 万 ha であるのに対し、FAO の 2002 年のデータでは 1690 万 ha と約 4.4 倍大きく見積もり、フランス (FAO 2007) においては 5 倍、ドイツ (FAO 2007) においては 4.3 倍ほど大きく見積もっている。一方インドの場合、本研究が 2375 万 ha であるのに対し、FAO の 2005 年のデータでは 2471 万 ha とほぼ等しい。また二期作を行っている国に関しては、休耕地面積が小さく見積もられる傾向にある。世界全体では休耕地面積を大きく見積もる傾向にあり、それを考慮すると、休耕地から得られるバイオ燃料ポテンシャルは大きく見積もられた値であるといえる。

(3) 牧草地を除いた草地

牧草地のデータには Agricultural Lands in the Year 2000 M3-Pasture Data (Ramankutty, 2008) を用いた。Grazing land からこの牧草地を除いた残りの草地において、バイオ燃料作物の栽培を想定する。

(4) 生態系保護のため原生林や保護区を除いた森林の一部

原生林には World Resources Institute (WRI) が提唱している Frontier forest のデータを、保護区には World Database on Protected Areas (WDPA) が提供している Reserved area のデータを用い、これらの土地を Forestry から除いた。ただしこれらの土地を除外することで生態系が十分に守られるわけではない。残った森林面積の一部にアブラヤシやジャトロファなどのバイオ燃料用植物の栽培地に転用することし、その転用率は 10% とした。また、アブラヤシやジャトロファの収量は 12 [dry-t/ha] を用いた。

(5) バイオ燃料ポテンシャル推定ための計算条件

本研究では陸上における世界のバイオ燃料ポテンシャルの推定において以下の 2 つのケースを想定する。

ケース 1 では、この章の (2) ~ (4) で述べた 3 つの土地においてバイオ燃料の栽培を想定した際のポテンシャル量の推定を行う。ケース 2 では、先行研究である WBGU とできる限り同じ栽培地条件でバイオ燃料を栽培した際のポテンシャル量の推定を行う。WBGU は耕作地や生態系にとって重要な地域、炭素の貯蔵庫である森林を除き、残る土地の中で生態系の保全の程度を幾つか変えて、バイオ燃料の栽培を想定しており³⁾、本研究では

表-2 世界の 19 地域における作付け回数

地域	作付け回数	地域	作付け回数
Canada	1.0	Eastern Europe	1.0
United States	1.0	Baltic States, Belarus	0.8
Central America	1.0	Rest of former USSR	0.8
South America	1.0	OECD Europe North	1.0
Northern Africa	1.0	OECD Europe South	1.0
Western Africa	1.5	East Asia	1.5
Eastern Africa	1.0	South East Asia	1.2
Southern Africa	1.0	South Asia	1.3
Japan	1.5	Middle East	1.0
Oceania	1.5		

WBGU の栽培条件とできる限り同じ条件（生態系の保全に関する条件が最も緩い 100～120EJ の場合）で計算を行うため、草地での栽培を想定し、劣化土壌による影響を考慮した。劣化土壌のデータは Global Assessment of Human-Induced Soil Degradation (GLASOD) を用い、その劣化土壌の影響には、WBGU と同様の条件（GLASOD のカテゴリ-3 では収量が 30%になる）を用いた³⁾。入手することができなかった土地利用データが存在するため、栽培地は完全に一致せず、推定値には幅が存在する。

ケース 1 では、耕作地や保護区など人類や生態系にとって最低限必要だと思われる土地を除いた土地において、可能な限りバイオ燃料の栽培を想定しており、さらに土壌も十分な栄養を仮定しているので、推定されるバイオ燃料ポテンシャルは最大値に限りなく近い。しかしその推定量がごく僅かであれば、バイオ燃料の導入に有効性はないということになる。そのため、地上にどれほどのバイオ燃料ポテンシャルが存在し、どの程度エネルギー需要を満たすのか評価するのがケース 1 の目的である。土壌に十分な栄養を仮定したのも、バイオ燃料ポテンシャルの最大値を求めるためである。今後、H08 の作物生長モデルに、土壌の栄養が作物収量に与える影響を追加し、土壌の栄養がバイオ燃料ポテンシャルにどの程度影響を及ぼすのかを評価する必要がある。

ケース 2 は、ポテンシャル量の推定を行う際に大きく影響を及ぼすのは、モデルの違いなのか栽培地条件の違いなのかについて、結果同士を比較・検討することで明らかにするのが目的である。両ケースの違いは、ケース 2 の方がケース 1 より多くの土地を生態系のために保護し、主なバイオ燃料の栽培地が劣化土壌である点である。

4. 結果・考察

ケース 1・ケース 2 における結果および現在の一次消費エネルギーを表 3 にまとめた。ケース 1 に関して、現在の一次消費エネルギーが 467EJ であるのに対し、世界のバイオ燃料ポテンシャルはその 2.4 倍の 1120EJ（残余 256EJ）にのぼり、過去 2 つの研究に比べると 4～33 倍と本研究の推定値は遙かに大きい値である。アメリカ・中国・ヨーロッパを除く国と地域において、バイオ燃料ポテンシャルが一次消費エネルギーを上回り、特にアフリカ大陸には多くのバイオ燃料ポテンシャルが存在することを示す結果となった。自国の一次消費エネルギーが多いため、アメリカ・中国ではエネルギー比が 1 を下回っているが、有しているバイオ燃料ポテンシャルは大きい。バイオ燃料ポテンシャルの内訳を見ると、ほとんどの国・地域において草地が一番のバイオ燃料の供給源となっており、とりわけアメリカ大陸とアフリカ大陸は草地から得られるポテンシャル量が大きい。図 2 は草地から得ることのできるバイオ燃料ポテンシャルについて示した図で、色が赤くなるほど大きなポテンシャルを意味しているが、高いポテンシャルを示している地域はエチオピアやアルゼンチンの高地、アフリカのサバンナである。これは本研究が想定した草地には高地や急峻な斜面、サバンナなどの地域が含まれ、気象条件さえそろえばバイオ燃料が得られるためである。加えて、H08 の作物成長モデルにおいて、世界中で先進国と同水準の栽培が行われていると仮定したこともポテンシャル量が大きくなった要因であると考えられる。また、残余ポテンシャルは世界全体で約 256EJ あると推定され、残余ポテンシャル

表-3 ケース 1 およびケース 2 における、各大陸・国のバイオ燃料ポテンシャル。ケース 1 に関しては各地域の一次消費エネルギーおよびバイオ燃料ポテンシャルとのエネルギー比が示し、さらにはバイオ燃料ポテンシャルに関しては 3 つの栽培地の内訳が示してある。なお、農地から得られる残余のバイオ燃料ポテンシャルは休耕地に含まれ、本研究ではバイオマスの持つエネルギー量に 18.6GJ/Mg を用いた。一次消費エネルギーは World Energy Outlook, 2009 の 2009 年の値である²⁾。

地域・国名	ケース 1						ケース 2
	A：一次消費 エネルギー (EJ)	B：バイオ燃料 ポテンシャル (EJ)	バイオ燃料ポテンシャルの内訳 (EJ)			エネルギー比 B/A	バイオ燃料 ポテンシャル (EJ)
			休耕地	草地	森林 10%		
オセアニア	5.78	44.6	11.3	30.8	2.48	7.72	1.23～4.95
ヨーロッパ	116	97.4	42.8	34.9	19.7	0.84	13.1～35.1
アメリカ	91.4	88.8	41.2	41.9	5.7	0.97	9.23～25.6
ブラジル	9.45	69.7	3.19	56.3	10.2	7.38	4.48～24.8
アメリカ大陸	135	332	77.0	226	29.3	2.46	22.6～79.0
インド	19.6	42.3	16.1	24.8	1.40	2.16	6.85～19.9
中国	91.2	84.4	27.8	53.0	3.63	0.92	8.01～22.1
アジア	168	241	65.2	164	11.7	1.43	18.0～61.6
アフリカ大陸	15.1	405	77.6	314	12.9	26.8	14.0～51.5
世界合計	467	1120	274	770	76.1	2.40	70～223

図- 2 草地から得ることのできるバイオ燃料ポテンシャル

(ケース 1). 赤い色ほど得られるエネルギーが大きい。

だけで現在の一次エネルギーの約 55%に相当する。残余のみの利用でこれだけのエネルギーが得られるということは、食料との競合を考慮すると重要な意味を持つ。

ケース 2 において、世界のバイオ燃料ポテンシャルは 70~233EJ と推定され、WBGU の 100~120EJ と近い値となった。ケース 1 とケース 2 の推定値の差(887~1050EJ)の主な要因が、栽培地面積の違いなのか、劣化土壌の影響 (GLASOD のカテゴリー3 では収量が 30%になる) によるものなのかを明らかにすると、786~1023EJ (約 90%以上) が栽培地面積の変化による影響であり、劣化土壌を考慮した事による影響は 27~101EJ (約 10%以下) である。両ケースの推定値の差のほとんどが、栽培地面積の違いに起因している。栽培地面積の違いは、可能な限りの土地でバイオ燃料作物の栽培を想定したケース 1 に対し、ケース 2 が、生態系保全を優先し、バイオ燃料作物を栽培しても生態系にとって差し支えないと思われる土地のみでの栽培を想定するという、保守的な条件であることから生じている。

WBGU とは異なるモデルを用いながらも、栽培地条件をほぼ同じにすることで、推定値が WBGU の値と近い値となるという結果から、バイオ燃料ポテンシャルの推定における不確実性の幅は、栽培地面積に大きく依存しており、両ケースの推定値が大きく異なるのも、過去の研究結果と比較して本研究の結果が大きいのも、栽培地条件の違いによる影響が大きい。一方で、モデルの違いによる影響は相対的に小さい。また、用いた土地利用データの不確実性が今回の推定値に大きく影響を及ぼしている可能性を示唆する結果ともいえる。

5. まとめ

本研究は世界のバイオ燃料ポテンシャルの推定を行ったものである。アブラナ・サトウキビ・ダイズ・テンサイ・トウモロコシ・コムギ・コメの 7 種類バイオ燃料作物として想定し、その収量は全球統合水資源モデル: H08 を用いて再現した。バイオ燃料作物の栽培地には (i) 休耕地 (ii) 牧草地を除いた草地 (iii) 生態系保護のた

め原生林や保護区を除いた森林の一部を選んだ。その結果、世界のバイオ燃料ポテンシャルを 1120EJ と推定した。

過去の研究結果とできる限りの同じ条件のもとでの世界のバイオ燃料ポテンシャルの推定も行い、バイオ燃料ポテンシャルの推定を行う際に大きく影響を及ぼす要因は、モデルの違いなのか栽培地条件の違いなのかを明らかにすることを試みた。その結果、過去の研究結果に近い推定値となり、世界のバイオ燃料ポテンシャルの推定には、栽培地に大きく影響し、モデルの違いによる影響は相対的に小さいことが分かった。

謝辞： 研究は CREST『世界の持続可能な水利用の長期ビジョン作成』(代表：鼎 信次郎) の成果の一部である。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 小泉達治. バイオエタノールと世界の食糧需給, 筑波書房 (2007), pp15-88.
- 2) IEA. World Energy Outlook, 2009
- 3) German Advisory Council on Global Change (WBGU), Future Bioenergy and Sustainable Land Use, (2008), pp95-131.
- 4) Robertson, G.P., et al., Sustainable Biofuels Redux, Science 3 October (2008), pp49-50.
- 5) Yamamoto, H., Fujino, J. and Yamaji, K., Evaluation of bioenergy with a multi-regional global-land-use-and-energy model. Biomass and Bioenergy, 20, (2001), pp151-159.
- 6) Campbell, J.E., Lobell, D.B., Genova, R.C. and Field, C.B., The Global potential of Bioenergy on Abandoned Agriculture Lands, Environmental Science & Technology, 42, (2008), pp5791-5794.
- 7) Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., et al., An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing, Hydrology and Earth System Sciences, 12, (2008), pp1007-1025.
- 8) Hanasaki, N., Inuzuka, T., Kanae, S. and Oki, T., An estimation of global virtual water flow and sources of water withdraw for major crops and livestock products using a global hydrological model, Journal of Hydrology, 384, (2010), pp232-244.
- 9) Murata, Y., Dependence of potential Productivity and Efficiency for Solar Energy Utilization on Leaf Photosynthetic Capacity in crop Species, The Crop Science of Japan, 50, (1981), pp223-232.
- 10) Lal, R. Crop residues as soil amendments and feedstock for bioethanol production, Waste Management, 28, (2008), pp747-758.
- 11) 川島博之. 世界の食糧生産とバイオマスエネルギー2050 年の展望, (2008), pp10-13.
- 12) Döll, P and Siebert, S. Global modeling of irrigation water requirements, WATER RESOURCES RESEARCH, 38, 4, (2002), pp8-1 – 8-10.

(2010. 9. 30 受付)