

農作物の栽培を想定した放棄地および休耕地におけるバイオ燃料の潜在性評価

誌名	環境科学会誌 = Environmental science
ISSN	09150048
著者名	萩原,健介 石田,裕之 花崎,直太 鼎,信次郎
発行元	環境科学会
巻/号	26巻3号
巻号補足	
掲載ページ	p. 287-296
発行年月	2013年5月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



シンポジウム論文

農作物の栽培を想定した放棄地および
休耕地におけるバイオ燃料の潜在性評価萩原 健介^{*†}・石田 裕之^{**}・花崎 直太^{***}・鼎 信次郎^{**}

摘 要

再生可能エネルギーや温室効果ガス排出削減等の関心から、バイオ燃料が注目される一方で、食料との競合等の懸念もあり、早急にバイオ燃料の潜在性について評価される必要があるが、その研究が十分ではない。これまでの筆者らの研究では、世界のバイオ燃料のポテンシャルの上限値は約 1120EJ であると推定されていたが、この推定値を求める際には高地やサバンナなどに代表される、バイオ燃料の栽培には適さないと考えられる土地の利用も想定されていた。そこで本研究では、バイオ燃料作物の栽培地としてより現実的である放棄地および休耕地を対象として、世界のバイオ燃料ポテンシャルの推定を行った。その結果、放棄地および休耕地におけるバイオ燃料ポテンシャルを 237EJ と推定し、これは世界の一次消費エネルギーの約 47% に相当する。加えて、先行研究の結果との差である約 880EJ のうち、ほとんどが栽培地の違いに由来し、果たして人類が実際にどれだけバイオエネルギーを享受できるかは、これまで作物の栽培が行われてこなかった土地を、どの程度利用するか大きく依存することが明らかとなった。また、放棄地の劣化土壌の影響を考慮した場合、放棄地のバイオ燃料ポテンシャルが 128EJ から 24% 減少した 97EJ になるという結果から、実際の放棄地のバイオ燃料ポテンシャルは 97-128EJ の間に位置していると結論づけた。

キーワード：バイオ燃料ポテンシャル、全球水資源モデル、放棄地、休耕地

1. はじめに

地球温暖化対策およびエネルギー問題の解決なくして、人類の持続可能な発展を望むことはほぼ不可能である。そして、この難題の解決策を模索し続ける中で最も有効な手段の一つとして注目されたのがバイオ燃料である。

バイオ燃料は主に植物を原料として作られ、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ている。このバイオ燃料は、再生可能エネルギーや二酸化炭素排出削減効果といった特徴を有することから「地球に優しいエネルギー」として脚光を浴び、近年バイオ燃料の利用は、増加の一途をたどっている^{1, 2)}。

一方で、バイオ燃料の生産増大は限りある土地・水資源をめぐる食料との競合、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懸念されており³⁾、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。

筆者らはこれまでに、耕作地や保護区など人類にとって最低限必要だと思われる土地を除いた、残る地上におけるバイオ燃料の可能栽培量の算出を試み、世界のバイオ燃料ポテンシャルの上限値の推定を行ってきた⁴⁾。これにより、世界のバイオ燃料

2011 年 12 月 22 日受付, 2012 年 1 月 24 日受理

* 東京工業大学大学院土木工学専攻, 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

** 東京工業大学大学院情報環境学専攻, 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

*** (独) 国立環境研究所, 〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

† Corresponding author: hagiwara.k.aa@m.titech.ac.jp

ポテンシャルは約 1120EJ と推定され、これは 2010 年の世界の一次消費エネルギー (500EJ)⁵⁾ の 2.4 倍に相当する。また、アフリカ大陸において特に大きなバイオ燃料ポテンシャルが存在することも明らかとなった。しかし上記の推定には、高地やサバンナに代表されるような、バイオ燃料の栽培に適さない可能性のある土地の利用も想定されていた。それらの土地ではこれまでに一度も作物栽培に利用されたことがないうえに、単収が低い場合や基本的なインフラ設備の整備が困難な場合がある。

これに対し、バイオ燃料の栽培がより現実的である土地として、休耕地および放棄地の存在が挙げられている^{6,7)}。休耕地および放棄地は、食料の生産が行われていない土地であることから、仮にバイオ燃料の栽培が行われたとしても食料との競合を起こしにくい土地とされ、また、過去に一度は作物栽培の歴史を持つ土地であることから、バイオ燃料の栽培の対象地域として現実的であるとされている^{6,7)}。この放棄地をバイオ燃料の栽培地として選択した最新研究には Campbell et al. がある⁶⁾。Campbell et al. は、全球の耕作地面積および牧草地面積の歴史の変遷を紐解くことで、世界の放棄地面積を独自に算定し、世界の放棄地におけるバイオ燃料ポテンシャルを 34 ~ 41EJ と推定した。これは 2010 年の一次消費エネルギーの 6.8 ~ 8.2% に相当する。

ところで本研究は、バイオ燃料の原料に「作物」を選択した。バイオ燃料の原料として木本や草を対象とした先行研究もあり³⁾、収量の面から見ると木本や草に利があるものの、干ばつ等の異常気象に起因する食の安全保障を考慮すると、食料に転用できる作物をバイオ燃料として栽培することは、有効な政策手段の一つであると考えられ、作物に関して議論する価値は十分にある。

筆者らはこれまでに、将来の食料需要を考慮した上で、放棄地および休耕地を対象地域とした世界のバイオ燃料ポテンシャルの推定を先行研究として行ってきた⁸⁾。そこでは、食料増産のために必要な放棄地および休耕地を確保した後に、残る休耕地と放棄地におけるバイオ燃料ポテンシャルを推定した。しかし、これらの土地全体におけるバイオ燃料ポテンシャルの上限値については言及されていない。また、放棄地および休耕地の推定に関する詳しい情報や考察などについても、紙幅の制約もあり、十分な記述が行われなかった。そこで本論文では、先行研究⁸⁾では記述することができなかった情報や結果、問題点に言及しながら、放棄地および休耕地のみを栽培対象地として想定したバイオ燃料

の潜在性評価を行い、その結果と萩原ら⁴⁾の結果 (世界全体で約 1120EJ) との差異が、どの要素に由来するのかを明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

本研究が設定した計算条件は、萩原ら⁴⁾を引用している。したがって、詳しくはそちらを参照されたいが、ここでは読者の便宜のために短く要点を記す。

2.1 バイオ燃料ポテンシャルおよび残余の定義

本研究ではバイオ燃料ポテンシャルを『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「この地域はこの作物を植えなければならない」等の政策的な土地利用制約を受けず、『世界中どのような種類の作物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²⁾、この定義を用いることで、過去の結果との比較が可能となる。またバイオ燃料の原料となる作物を『バイオ燃料作物』と呼ぶことにする。

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するポテンシャルをバイオ燃料ポテンシャル、残余が有す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。

2.2 全球水資源モデル: H08

Berndes et al.⁷⁾によって体系的にレビューされた先行研究における従来の方法では「単位面積あたりに見込める植物 (作物) の平均的収量」と「植物 (作物) の栽培可能面積」の二つから、バイオ燃料ポテンシャルを推定する手法が多かった。しかしこの手法では、統計値が存在する等の、限定された耕作地のみから得た結果を、気候条件の異なる地域に広く適応してしまうため、収量を過大評価する傾向にあった⁹⁾。

そこで本研究は、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扱うことのできる全球水資源モデル^{10, 11)} (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利用することができ、気象および土地利用の情報を与えることで、全球の作物収量を、空間解像度 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ で計算することができる。H08 の数値実験の設定条件には Hanasaki et al.¹¹⁾ の結果を利用した (表 1)。

2.3 バイオ燃料作物

バイオ燃料作物の選択および作付けに関しては、萩原ら⁴⁾と同様の計算条件を用いた。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が行われている 7 作物 (アブラナ・コムギ・コメ・サトウキビ・ダイズ・テンサイ・トウモロコシ) 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。

上記の 7 種のバイオ燃料作物は、すべて天水のみでの栽培を想定し、加えて、世界中で十分な土壌の栄養を想定し、害虫・疫病被害はないと仮定した。ここで天水のみを仮定したのは、本研究で考慮している放棄地・休耕地では現時点では灌漑が行われておらず、天水条件のままでのポテンシャルの推定が最初の研究対象としては適切であろうと考えたためである。灌漑条件下でのポテンシャルの推定は、一段階上の工夫を必要とするため、今後の課題としたい。また、恒常的なバイオ燃料作物の栽培のために、テンサイがテンサイ・コムギ・トウモロコシの 3 年輪作、サトウキビが 5 年に一度の休耕、その他の作物については、4 年に一度の休耕を想定した。

なお前述の輪作は、萩原ら⁴⁾では考慮しておらず、本研究において新たに加えた内容である。

また、ポテンシャルを推定することが目的であるため、上記の各作物の、アメリカの計算収量がアメリカの観測収量が合うように H08 の補正係数を決定し、これを世界一律に適用した。この補正によって、H08 の収量を「先進国と同水準の農業技術を用いた作物栽培を、各々の国の気象条件の下で行っ

た場合の収量」と仮定することができる。そのため、実際の収量と比較すると主に発展途上国において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。

図 1 は H08 によるバイオ燃料作物の全球作付け図である。熱帯から温帯にかけてはサトウキビが、温帯から亜寒帯にかけてはテンサイが主として栽培される想定となっている。これは、サトウキビおよびテンサイの収量が、そのほかの 5 作物の収量と比較すると数倍も大きいことに起因している。

しかしながら本研究では各作物からバイオ燃料への変換効率を考慮していない。したがって、例えばアメリカでは主にサトウキビやテンサイが最適種となったが、小泉²⁾に記載されている転換効率を考慮するとトウモロコシが選択される点には注意されたい。

2.4 残余の利用について

植物の実を取り除いた茎、葉、根などの残余は、食べる部分ではないため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、現段階ではこれらの残余のバイオエタノール等の液体燃料への転換が困難であるが、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。そのため、残余をポテンシャル推定の対象とする価値は十分にある。

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 25% 以上取り除いてしまうことで、土壌に悪影響を及ぼすことが報告されているので¹²⁾、今回は、残余の 25% だけバイオ燃料に転用することにする。

表 1 数値実験の設定条件 (Hanasaki et al. (2010) より)¹¹⁾

入力データ	Reference
Spatial domain/resolution	Global, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$
Temporal domain/resolution	1980-1999, 6 h
Meteorological forcing	NCC (Ngo-Due et al., 2005)
Albedo	ISLSCP2 (Hall et al., 2006)
Cropland	Ramankutty et al. (2008)
Crop type	Monfreda et al. (2008)

3. バイオ燃料作物の栽培地

3.1 放棄地面積の推定

放棄地とは、かつて耕作地や牧草地であったが、耕作民の移住や土壌の劣化を原因として、現在は人間活動に利用されていない土地を指す。過去に一度は作物栽培が行われていた土地であることから、バイオ燃料作物の栽培の対象地域として現実的であると考えられ、過去の研究においても言及されている⁶⁾。放棄地面積の算定法には萩原ら⁸⁾と同様の手法を用い、以下にその萩原ら⁸⁾の記述を引用する。

まず、放棄地面積の算定にあたり HYDE3.1 (History Database of the Global Environment 3.1) を用いた¹³⁾。HYDE3.1 は、BC10000 から AD2005 における陸地に占める耕作地および牧草地の割合を、空間解像度 5min で与えており、本研究では 1950 年から 2000 年までの 10 年ごとのデータを使用した。ただし、牧草地面積が減少し耕作地が増加したグリッドにおいては牧草地が耕作地に遷移した可能性があるように、10 年ごとの耕作地および牧草地の減少分が放棄地であるとは限らない。そこで、放棄地面積を以下の 2 つの手法から求めた。

一つは、各グリッドにおいて 1950 年から 2000 年を通じて最大の耕作地面積および牧草地面積を求め、それを 2000 年の耕作地面積および牧草地面積から引いた値を放棄地とする手法である。これは、かつて一度でも耕作地または牧草地であった場所は放棄地と見なしており、放棄地面積を過大評価する手法である。もう一つは、同一のグリッド内で牧草地面積の減少かつ耕作地面積の増加が起こった場合は、牧草地が耕作地に転移したとし、逆の場合も、耕作地が牧草地に転移したとする手法である。これは耕作地および牧草地の変化分を最小限にする計算手法であるので、放棄地面積を過小評価する手法である。これら 2 つの手法によって、放棄地面積は 451 ~ 597Mha と推定され、求まった放棄地のうち、年代経過とともに都市部や森林へと遷移した土地を MODIS satellite map of the current forest and urban land cover¹⁴⁾ を用いることによって取り除き、最終的に放棄地面積を 354 ~ 486Mha と推定した。先行研究である Campbell et al.⁶⁾ の推定値は 385 ~ 472Mha であり、本研究の推定値と概ね一致している。

今回は、前述の 2 つの手法によって求められた放棄地面積の平均である 420Mha を以降の計算に用いた。図 2 は、世界の放棄地の分布図であり、空間解像度 5min の一つのグリッドに占める割合で表してある⁸⁾。図 2 より、アメリカ北東部や東ヨーロッ

パ、インド中西部および中国北東部に放棄地が多く存在していることが分かる。

推定した放棄地面積については、現実の値がないため、現実と比べた際の精度を求めることが困難であるが、先行研究において⁶⁾、HYDE3.1 の代わりに the Center for Sustainability and Global Environment (SAGE) が公開している Historical Croplands Dataset (1700 ~ 1992) を、MODIS の代わりに the International Geosphere Biosphere Program (IGBP) が公開している IGBP DIScover data set を用いて推定した放棄地面積についても、ほぼ同様の値となることが示されており⁶⁾、放棄地面積算定の手法については妥当であると言える。

3.2 休耕地面積の推定

入手可能な各国の休耕地面積のデータには限りがあり、過去の研究においては、休耕地に関しては「全耕作地の 10% を余剰耕作地とする」等の大雑把な仮定がとられている⁷⁾。そこで本研究では、川島¹⁵⁾ の『FAOstat が公開している、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』という算定法を用いて、実際の休耕地面積を求めることにした。その算定には萩原ら⁸⁾と同様の手法を用い、以下にその説明を再度記すとともに、萩原ら⁸⁾では記述していない内容にも言及する。

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 の「世界の 19 地域における作付け回数」を用いることで個別に求めた¹⁶⁾。休耕地面積推定の詳細に関しては萩原ら⁴⁾を参照されたい。なお、収穫面積と農地面積のデータには、FAOstat の 2004 ~ 2008 年の 5 年間の平均データを用い¹⁷⁾、推定した休耕地面積が負となった国については除外した。

本研究が推定した 2004 ~ 08 の 5 年平均の休耕地面積と、FAO が公開している各国の休耕地面積、および休耕地面積の面積比をまとめたものが表 2 である (入手可能なデータに限りがあるため、比較年度が合わない国が存在するが、数年で休耕地面積が大幅に変化することはないと思われるので、比較年度が合わない影響は無視できるものとした)。

その結果、アメリカとカナダについては本研究の推定値は FAO による公開値よりも数倍大きな値を算定しているが、そのほかの国に関して両者はおおむね一致している。本研究では作物栽培が 1 年以上かつ 4 年以下行われていない土地は休耕地として算定されるが、FAO の公開している限られた国の休耕地面積の値にはこのような土地は含まれていない。アメリカ、カナダにおいてはそのような土地が

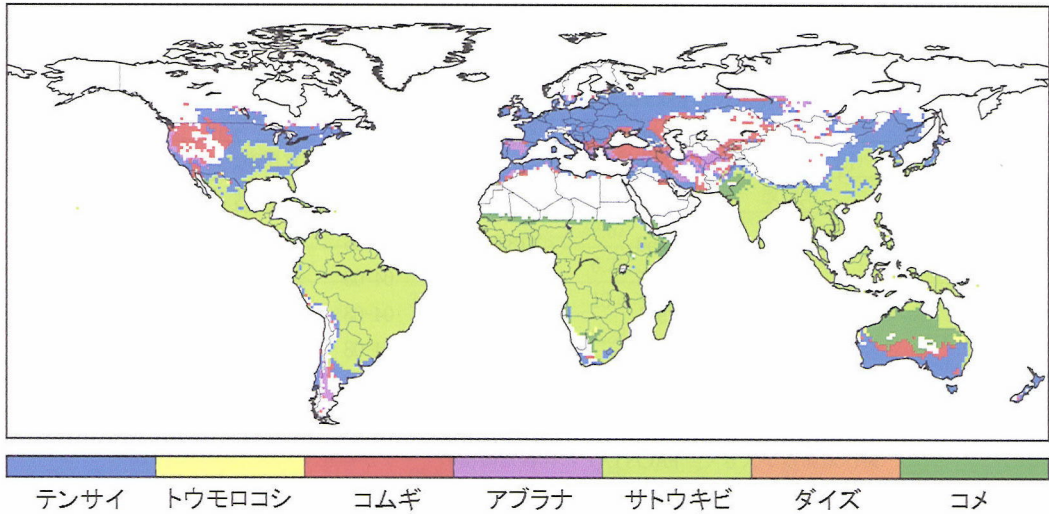


図1 H08によるバイオ燃料作物の全球作付け図。アブラナ・コムギ・コメ・サトウキビ・ダイズ・テンサイ・トウモロコシの7作物のうち、最も収量の大きい作物が植えられることを想定した。白色は収量が1 [t/ha] 以下の地域。

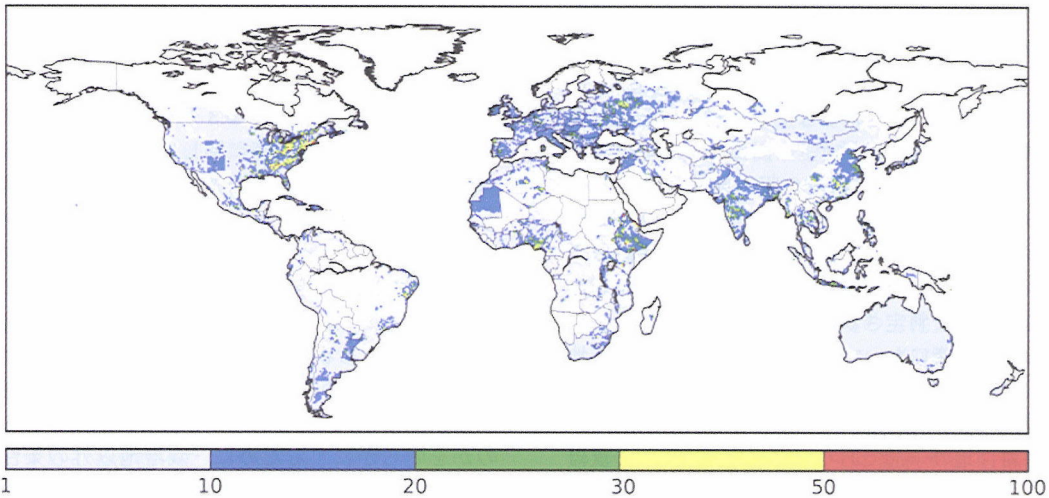


図2 世界の放棄地の分布図。空間解像度5min の一つのグリッドに占める割合で表してある。萩原ら⁸⁾より引用。

多く存在するために、本手法による推定値がFAOの発表している値を上回ってしまったと考えられる。本研究では世界全体で統一的な手法を用いるため、表2のA欄に示した値を採用した。また、4年以下の休耕地であっても、それぞれの時点においては休耕地であることは確かであり、本論文の狙いである放棄地と休耕地の全てを用いた場合の最大ポテンシャルの推定のためには、そのような土地も休

耕地として差し支えないと考えた。本研究が推定した世界の休耕地面積は325Mhaで、これは世界の耕作地の約20%に相当する。

また、耕作地面積と休耕地面積が比例すると仮定して、国ごとの休耕地面積を空間解像度0.5°で空間分布させた結果が図3である。図3よりアメリカ北部、東ヨーロッパ、西アフリカそしてインド北部に休耕地が存在していることが分かる。一方で、国

表 2 本研究および FAO の休耕地面積の比較

国名*	A：本研究** 1000Ha	B：FAO 1000Ha	対象年	比 A/B
アメリカ	39431	16064	02	2.45
インド	20786	25015	04-08	0.83
カナダ	18144	3728	04-07	4.86
インドネシア	8350	11880	04-05	0.7
トルコ	5345	4600	04-08	1.16
パキスタン	7951	6030	04-08	1.31
フランス	1159	1234	04-08	0.94
...				
合計 (234 カ国)	約 32500			

*耕作地面積が大きく、FAOSTAT に休耕地面積のデータが存在する国から選出。
**本研究の推定値には 2004～08 の 5 年平均の値を用いた。

全体が白色となっている国は、推定した休耕地面積が負の値となり、除外した国である。原因としてはまず、二期作および二毛作の影響が考えられる。前述したように本研究では Döll and Siebert の「世界の 19 地域における作付け回数」を用いてその影響を考慮した。例えば東南アジア諸国は作付け回数が 1.2 回であるので、FAO の収穫面積を 1.2 で割ることで補正を行った。しかしながらミャンマーなどの国では実際の作付け回数が 1.2 回よりも多い可能性があり、依然として補正後の収穫面積が耕作地面積よりも大きくなった。アルゼンチンについては、FAO の統計データによると耕作地面積と収穫面積がほぼ等しく、本研究における休耕地の定義を満たす土地がないと判定された。

なお、本研究において、年代経過における耕作地面積および牧草地面積の減少分、すなわち耕作地でも牧草地でもない土地が放棄地であるのに対し、休耕地は耕作地の一部であり、放棄地と休耕地の重複は起こっていない。

4. 結果・考察

本研究が推定した各大陸・国別のバイオ燃料ポテンシャルおよび現在の一次消費エネルギーを表 3 にまとめた。本研究が推定したバイオ燃料ポテンシャルは、放棄地と休耕地を合計して約 237EJ（うち残余 80EJ）となり、これは現在の世界の一次消費エネルギーの約 47％に相当する。本研究ではバイオ燃料作物として一番収量の高い作物を選択しており、また、作物収量は全球で先進国と同水準と仮定して計算を行った。全球バイオ燃料ポテンシャルをこのように最大値として推定しようという試みは

Campbell et al.⁶⁾や WBGU³⁾などの既存研究に倣ったものであり、これにより既存研究との比較が可能になる。

今回推定したバイオ燃料ポテンシャルを大陸別にみると、アメリカ大陸、アフリカ大陸、アジアの 3 地域で推定値の約 90％を占めている。アメリカ大陸とアジアにおいては、一次消費エネルギーが大きいため、エネルギー比が 0.3～0.5 程度にとどまっているが、アフリカ大陸に関しては、一次消費エネルギーが小さいため、エネルギー比が 4.6 という大きな値となった。一方でヨーロッパに関しては、バイオ燃料ポテンシャルが小さいことに加え、一次消費エネルギーも大きいため、エネルギーは 0.1 と小さい。

先行研究である萩原ら⁴⁾の推定結果と比べると約 880EJ もの違いがあるが、この違いが栽培地の違いによるものか、輪作の影響を考慮したことによるものかを明らかにするために、栽培地以外の条件を萩原ら⁴⁾と等しくした結果、推定された世界のバイオ燃料ポテンシャルは約 450EJ となった。本研究での推定結果は約 240EJ であるので、450EJ との差分である 210EJ が輪作を考慮したことによる影響である。これは先行研究との差である 880EJ の約 25％にあたり、残る約 75％の 670EJ が栽培地の違いによる影響であると言える。栽培地の違い、というのは萩原ら⁴⁾では耕作地や保護区以外での作物の栽培が仮定されたのに対し、本研究では放棄地・休耕地以外の土地を栽培地として考慮しなかったことに起因するものである。

萩原ら⁴⁾において、作物成長を再現するモデル以外の計算条件を、先行研究³⁾と可能な限り等しくし、

表 3 各大陸・国のバイオ燃料ポテンシャルと各大陸・国の一次消費エネルギー、およびそのエネルギー比。バイオ燃料ポテンシャルに関しては休耕地および放棄地の内訳が示してある。本研究ではバイオマスの持つエネルギー量に $18.6\text{GJ}/\text{Mg}^{12)}$ を用いた。一次消費エネルギーは BP Statistical Review of World Energy June 2011 の 2010 年の値を使用²¹⁾。() 内の数字は残余のポテンシャルを表す。単位は EJ。

地域・国名	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
			休耕地	放棄地	
オセアニア	5.78	6.65	2.67	3.98	1.15
ヨーロッパ	124	16.1	6.75	9.38	0.13
アメリカ	91.4	31.9	13.4	18.5	0.35
ブラジル	9.45	10.7	3.28	7.44	1.13
アメリカ大陸	142	72.5	29.8	42.7	0.51
インド	21.9	6.35	3.71	2.64	0.29
中国	102	17.9	7.82	10.1	0.18
アジア	196	68.5	33.5	35	0.34
アフリカ大陸	15.6	72.7	36	36.7	4.66
世界合計	503	237	109 (31.2)	128 (48.5)	0.47 (0.16)

モデルの違いがバイオ燃料ポテンシャルの推定にどの程度影響を及ぼすのかを明らかにした結果、先行研究³⁾と同様の値となることから、不確実性の幅は、どこで作物の耕作を想定するかという栽培地の違いによるところが大きく、数値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ている。そのため、本研究の推定値の不確実性の幅も、バイオ燃料作物の耕作地として想定した放棄地および休耕地面積の推定値がどれほど確からしいか、ということに大きく依存していると言える。そのなかでも、本研究が推定した放棄地は、耕作民の移住と土壌の劣化に起因して存在する土地であるため、果たして、放棄地での作物栽培が可能かどうか言及することが、不確実性の幅の究明に非常に重要である。そこで、放棄地がどの程度劣化土壌の影響を受けているかを明らかにすることを試みた。

劣化土壌の影響を明らかにするにあたり、土壌劣化指標（以下 GLASOD）を用いた¹⁸⁾。GLASOD は世界の土壌をその劣化具合に応じて 4 つに分類分けした土壌劣化指標のことで、1991 年に作成され、以後更新はされていないが、専門家達によって作成されており現時点で手に入る唯一の劣化土壌マップである¹⁹⁾。GLASOD による世界の劣化土壌の分布図を図 4 に示す。カテゴリーの数字が大きいほど、土壌の劣化具合が激しいことを表しているが、劣化土壌が広く分布している地域としては、中央アジア、東南アジア、中央アフリカの一部地域などが挙げられる。

GLASOD を用いることで、劣化土壌の影

響評価を試みた先行研究に Beringer et al. がある²⁰⁾。Beringer et al. は、作物の収量が GLASOD の Category 3 においては 50%、Category 4 においては 0% になるという仮定を用いており、本研究も Beringer et al. と同様の計算条件を用いることで、劣化土壌の影響を考慮した。

その結果、本研究が推定した放棄地面積 420Mha のうち、約 10% の 43Mha が Category 4 に、約 27% の 116Mha が Category 3 に該当し、放棄地のバイオ燃料ポテンシャルを 128EJ から 24% 減少した 97EJ と推定した。

しかし、GLASOD の重度の劣化土壌に該当する地域でも、タイやトルコなど、高収量を観測している地域が存在しており、適切なマネージメントによりバイオ燃料作物の栽培は可能であると考えられるので、実際の放棄地のバイオ燃料ポテンシャルは 97-128EJ の間に位置しているといえる。

一方で休耕地に関しても、生産量調整のための余剰生産地と地力回復のための土地が混在しているため、本研究が推定したすべての休耕地面積を利用可能というわけではないと思われ、その詳細について言及していく予定である。

また、バイオ燃料作物の恒常的な栽培を想定するために、本研究では、作物の輪作および残余の利用条件（残余の 25% のみ利用可能）を考慮したが、果たしてどの程度、実際のバイオ燃料作物栽培と比較して、理にかなったものであるかに関しても明らかにしていく必要がある。

今回、放棄地および休耕地における作物栽培は、

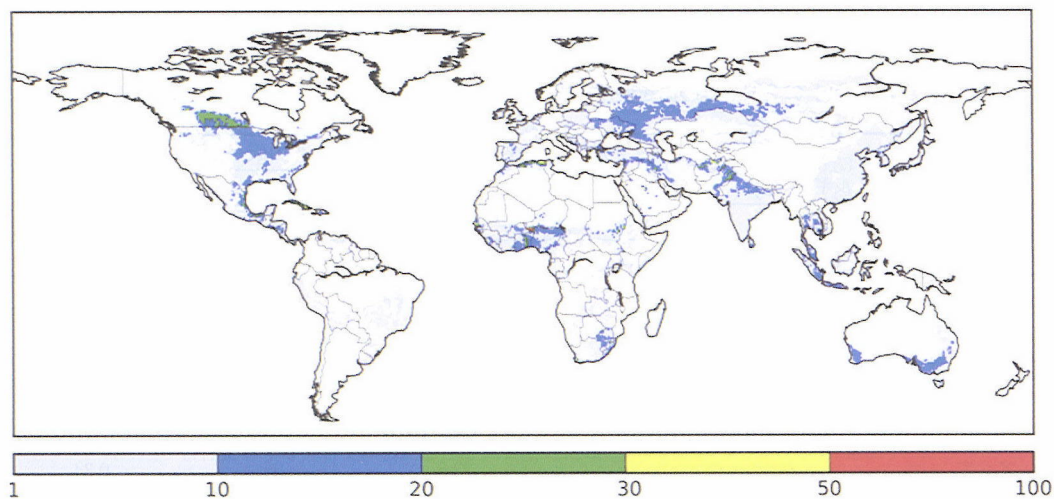


図3 世界の休耕地の分布図。空間解像度 0.5° の一つのグリッドに占める割合で表してある。

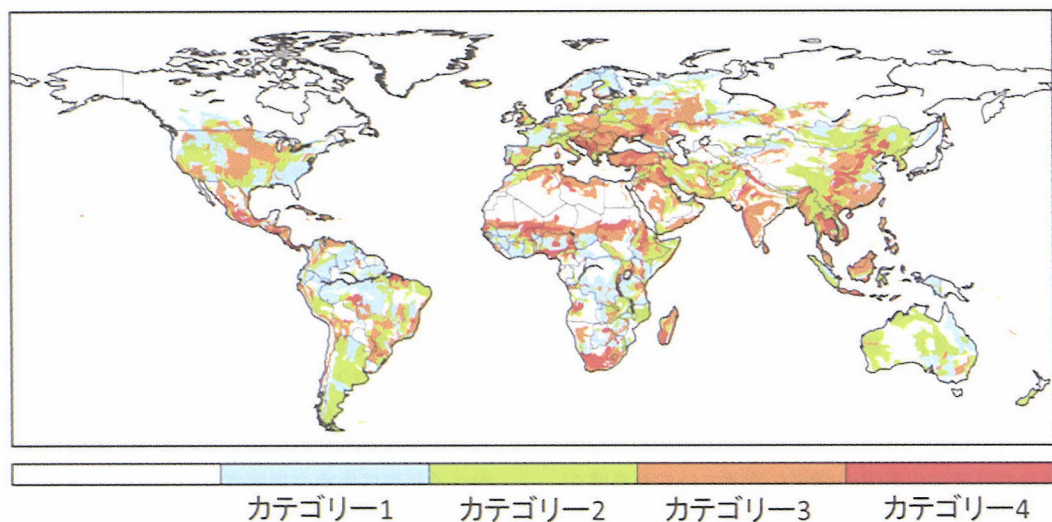


図4 世界の土壌劣化指標 GLASOD。カテゴリーの数字が大きくなるほど、土壌の劣化具合が激しいことを表している。

すべて天水のみでの栽培を想定したが、将来の灌漑面積の拡大に起因する影響に関しては、幾つかシナリオに分けて評価を行うことを検討している。

さらに、本研究ではポテンシャル推定ということで最大値に近い値を推定する手法が採られているが、例えば Pineiro et al²²⁾ らによって休耕地でバイオ燃料を栽培することが CO_2 を排出することになるという研究結果なども発表されており、全球における温室効果ガス削減への正味の貢献量を本研究

の発展として推定することも今後の課題として挙げられる。

5. 結 論

本研究は世界の放棄地および休耕地におけるバイオ燃料の潜在性評価を行った。バイオ燃料作物には7種の作物：アブラナ・コムギ・コメ・サトウキビ・ダイズ・テンサイ・トウモロコシを選択し、全球水資源 H08 によりこれら7種の作物の全球収量

を 0.5° の空間解像度で再現した。現在の放棄地および休耕地においてバイオ燃料作物の作付けを想定し、放棄地および休耕地面積をそれぞれ 420Mha, 325Mha と算定した。

本研究では、世界のバイオ燃料ポテンシャルを、放棄地と休耕地を合計して約 237EJ と推定し、これは現在の世界の一次消費エネルギーの約 47% に相当する。また、筆者のこれまでの研究結果と比較を行うと、先行研究の推定値が約 1120EJ であるので、本研究の推定値との差は約 880EJ であるが、この差のほとんどが、先行研究と本研究で対象とした栽培地の違いに由来している。

放棄地の劣化土壌による影響評価も試みた結果、放棄地のバイオ燃料ポテンシャルが約 24% 低下するという結果が得られた。今後の課題として、休耕地に関しては、余剰生産地と地力回復用の土地について言及することが挙げられる。

謝 辞

この研究は 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。

文 献

- Herbel H., T. Berunger, S.C. Bhattacharya, K.H. Erb and M. Hoogwijk (2010) Bioenergy production potential of global biomass plantations under environmental and agricultural constraints. *Global Change Biology Bioenergy*, 3, 299-312.
- 小泉達治 (2007) バイオエタノールと世界の食糧需給. 筑波書房. 15-88.
- German Advisory Council on Global Change: WBGU (2008) *Future Bioenergy and Sustainable Land Use*, Earthscan, London and Sterling, 95-131.
- 萩原健介・花崎直太・鼎信次郎 (2011) 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. *水工学論文集*, 55, 265-270.
- International Energy Agency: IEA (2009) *World Energy Outlook 2009*, OECF/IEA, Paris. 698pp
- Campbell J.E., D.B. Lobell, R.C. Genova and C. B. Field (2008) The global potential of bioenergy on abandoned agriculture lands. *Environmental Science & Technology*, 42, 5791-5794.
- Berndes G., M. Hoogwijk, and R. van Den Broek (2003) The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass and Bioenergy*, 25, 1-28.
- 萩原健介・石田裕之・花崎直太・鼎信次郎 (2012) 全球水資源モデルを用いた様々な食糧需要シナリオにおける農地拡大需要およびバイオ燃料潜在量の推定. *水工学論文集*, 56, 457-462.
- Chum H., A. Faaij, J. Moreira, G. Berndes, P. Dhamija, H. Dong, B. Gabrielle, A. Goss Eng, W. Lucht, M. Mapako, O. Masera Cerutti, T. McIntyre, T. Minowa, K. Pingoud, (2011) *Bioenergy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (Eds) Cambridge University Press, Cambridge, New York.*
- Hanasaki N., S. Kanae, T. Oki, K. Masuda, K. Motoya, N. Shirakawa, Y. Shen and K. Tanaka (2008) An integrated model for the assessment of global water resources—Part 1: Model description and input meteorological forcing. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 1007-1025.
- Hanasaki N., T. Inuzuka, S. Kanae and T. Oki (2010) An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model. *Journal of Hydrology*, 384, 232-244.
- Lal R. (2008) Crop residues as soil amendments and feedstock for bioethanol production. *Waste Management*, 28, 747-758.
- Goldewijk K., A.F. Bouwman and G. van Drecht (2007) Mapping contemporary global cropland and grassland distributions on a 5 by 5 minute resolution. *J. Land Use Science*, 2, 167-190.
- Friedl M.A., D.K. McIver, J.C.F. Hodges, X.Y. Zhang, D. Muchoney, A.H. Strahler, C.E. Woodcock, S. Gopal, A. Schneider, A. Cooper, A. Baccini, F. and C. Gao and Schaaf (2008) Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83, 287-302.
- 川島博之 (2008) 世界の食糧生産とバイオマスエネルギー 2050 年の展望. 東京大学出版会, 10-31.
- Döll P. and S. Siebert (2002) Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research*, 38, 1047.
- FAO, FAOstat, Available at: <http://faostat.fao.org>. (accessed August 2011).
- Oldeman L.R., T.R. Hakkeling and W.G. Sombroek (1991) World map of the status of human-induced soil degradation: An explanatory Note, International Soil Reference and Information Centre, Wageningen and United Nations Environment Programme, Nairobi, 35pp.
- Dornburg V., D. Van Vuuren, G. Van de Ven, H. Langeveld, M. Meeusen, M. Banse, M. Oorschot,

- J. Ros, G. Born, H. Aiking, M. Londo and H. Mozaffarian (2010) Bioenergy revisited: Key factors in global potentials of bioenergy. *Energy & Environmental Science*, 3, 258-267.
- 20) Beringer T., W. Lucht and S. Schaphoff (2011) Bioenergy production potential of global biomass plantations under environmental and agricultural constraints. *Global Change Biology Bioenergy*, 3, 299-312.
- 21) BP p.l.c (2011) BP Statistical Review of World Energy June 2011. 40pp
- 22) Pineiro G., E.G. Jobbagy, J. B. C. Baker, Murray and R. B. Jackson (2009) Set-asides can be better climate investment than corn ethanol. *Ecological Applications*, 19, 277-282.

Assessment of Global Energy Crop Potential on Abandoned Land and Fallow Land

Kensuke HAGIWARA *, Hiroyuki ISHIDA **, Naota HANASAKI ***
and Shinjiro KANAE **

(* Department of Civil Engineering Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8552, Japan

** Department of Mechanical
and Environmental Informatics Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8552, Japan

*** National Institute for Environmental Studies,
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan)

Abstract

Biofuel is expected to contribute reduction of greenhouse gas emission as a high renewable energy, while a growing demand for biofuels increases the risk of impairs food security. However, previous assessments of the potential of bioenergy are still very rare. Further, recent studies generally tend to overestimate the potential of bioenergy because they considered all current non-agricultural lands as potential cultivation for biofuel product. In this paper, we estimated the potential amount of energy crop globally. Two different land-cover types, abandoned land and fallow land, are considered to evaluate energy crop plantations. The estimated global bioenergy potential is 237EJ on abandoned land and fallow land. This value is equivalent to about 47% of current world primary energy demand. Although it is smaller than previous one due to considering different terms of potential land use, we believe that our estimation is relatively close to realistic situation. In addition, soil degradation on abandoned land causes decreased number of global bioenergy potential on abandoned land, from 128EJ to 94EJ.

Key Words: Bioenergy potential, water resources model H08, fallow land, abandoned land