耕作放棄地を活用するバイオ燃料生産 の温室効果ガス削減効果の検討

楊 翠芬¹・玄地 裕²・匂坂 正幸³

¹非会員 (独) JST低炭素社会戦略センター (〒102-0083 東京都千代田区麹町4丁目8番地)
E-mail:yang@jst-lcs.jp

²非会員 (独) 産業技術総合研究所 (〒305-8569 つくば市小野川16-1)

³非会員 (独) 産業技術総合研究所 (〒305-8569 つくば市小野川16-1)

本稿では耕作放棄地の活用によるバイオ燃料生産の可能性について検討した。また、耕作放棄地率が高い福島県をモデル地域とし、多収量米およびスイートソルガムを栽培して、バイオエタノールの生産・利用の最適化モデルを構築し、GHG排出量の少ないバイオエタノール生産・利用システムを検討した。結果としては、日本では農地への復元可能な耕作放棄地にて資源作物を栽培して約54万kLのエタノールが生産できる。また、福島県における水田・畑地への耕作放棄地にて多収量米およびスイートソルガムを栽培して年間約3.5万kLのエタノールが生産できる。バイオエタノールの使用により約3.2万t-CO₂eq削減できる。また、多収量米よりスイートソルガムからエタノール生産のGHG排出削減効果が高かった。

Key Words : fallow land, bio-fuels, greenhouse gas emission, land use change, energy crops

1. はじめに

バイオ燃料は、化石燃料使用量の削減、農業振興、地球温暖化抑制の観点で世界的に注目されている。特に有力な温暖化対策の一方策として、輸送用燃料としてのバイオ燃料の利用は、世界各国において導入が進められてきた。2007年1月にアメリカのブッシュ大統領は2017年までに約1.3億kLのバイオエタノール導入を目指す目標を発表した¹⁾。3月には欧州連合指令において、2010年に輸送用燃料の5.75%以上、2020年に10%以上をバイオ燃料で賄う目標を決定した²⁾。日本は、「京都議定書目標達成計画」において、2010年度までに原油換算50万kLのバイオ燃料(国産・輸入原料を問わず)を導入することを目標としており、ETBEやエタノールの利用、エタノールの生産が始まっている³⁾。また、バイオ燃料生産推進に当たっては、食料との競合や森林破壊などを引き起こさないように十分留意する必要があるとの認識の下、国産バイオ燃料の導入の拡大に向けて、2010年1月農林水産省は「日本型バイオ燃料生産拡大対策」を提出し、サトウキビ糖みつや規格外小麦などの安価な原料を用いたバイオ燃料の利用モデルの整備や技術実証を行い、2011年までに5万kL(国産原料のみ)、2030年頃にセルロース系原料、資源作物を活用して600万kLの国産バイオ燃料導入目標を示している。国産バ

イオ燃料の大幅な生産拡大を図るためには、食料や飼料などの既存用途に利用されている部分ではなく、水田に鋤き込まれている稲わらや製材工場など残材、林地残材、公園・河川敷などから発生する未利用バイオマスの活用や耕作放棄地などを活用した資源作物の生産に向けた取組を進めることが重要である。

農家の高齢化や後継者不足から我が国の耕作放棄地はこの20年間増加しており、2010年には約39.6万haと推計されている⁴⁾。耕作放棄地を活用してバイオ燃料の生産は地球温暖化対策の側面だけでなく、エネルギーセキュリティの向上や地域経済の活性化や農地の保全にもつながる。また、耕作放棄地を活用してバイオ燃料原料を栽培してバイオ燃料などの原料として利用するとともに、いざというときには食料供給基地として作付け農地を活用できる。

これまでに、バイオ燃料生産の経済性や環境影響を評価した事例が数多い^{4,5)}。著者ら⁶⁾は、耕作放棄地の利用の有無が稲わらからのバイオエタノール生産システムにおけるコスト、環境負荷排出量に及ぼす影響を検討した。高橋ら⁷⁾は、遊休農地にてエネルギー作物を栽培して、その作物からエタノールを生産するエネルギーシステムを設計し、そのシステムについて、エネルギー賦存量・経済性・エネルギー収支・CO₂排出削減量などの観点から評価した。しかし、農地への復元可能性の観点で耕作

放棄地を草を刈ることによりすぐに利用できる（即利用可能）土地、道路や排水などを整備してから利用できる（利用可能）土地、利用困難な土地に分けられるため、農地への復元可能性に分けて評価することが現実と考えられる。また、バイオ燃料の利用は地球温暖化対策の一つの方策になるため、温室効果ガスの排出の少ないエタノール生産・利用システムの検討が重要である。

そこで、本稿では、耕作放棄地を活用する場合、即利用可能・利用可能別のバイオ燃料の潜在生産量を推計した。また、耕作放棄地率の高い福島県をモデル地域とし、耕作放棄地にて食料生産と競合せず、多収量米および栽培適応域が広く生長の早いスイートソルガムを栽培して、バイオエタノール生産・利用最適化モデルを構築し、温室効果ガスの排出の少ないバイオエタノール（以下、エタノールと略記）生産・利用システムを提案することを目的とする。

2. 日本における耕作放棄地

耕作放棄地は、農林業センサスにおいて¹⁰⁾「以前耕地であったもので、過去1年以上作付けせず、しかもこの数年の間に再び耕作する意思のない土地」と定義されている。遊休農地は、農地法令上の用語であり、「耕作地などであったが、現に耕作の目的に供されておらず、かつ、引き続き耕作の目的に供されない」と見込まれるもの」と定義されている。耕作放棄地と遊休農地はほぼ同様の意味であるが、長期間放置され原野化しているような土地の取扱いには差異がある。本稿では一般的に使用されている耕作放棄地の用語を使用する。耕作放棄地を把握するにあたって、農林業センサスなどをもとに全国農業会議所が作成した遊休農地対策データベース¹¹⁾を参考にした。このデータベースでは、市町村別の耕作放棄地面積（水田、畑地、樹園地）を推計し、さらに農地への復元可能性を即利用可能、利用可能、利用困難にわけて示している。人力・農業用機械で草刈りなどでは直ちに耕作することが可能な土地（即利用可能）は約63万haとなる。草刈りなどでは直ちに耕作することができないが、基盤整備を実施して農業利用すべき土地は約16.9万ha、森林・原野化しているなど、農地としての利用が困難な土地は約4.7万haとなる。図-1に都道府県別の耕作放棄地面積（水田・畑地別）を示す。福島県における耕作放棄地面積が全国1位で、水田と畑地の合計約16,045haであった。そのうち即利用可能な耕作放棄地、利用可能な耕作放棄地、および利用困難な耕作放棄地の割合はそれぞれ15%、69%、16%となった。

図-1 都道府県別の耕作放棄地面積（田畑別）

3. エタノール生産ポテンシャル試算

長期的には、耕作放棄地での資源作物の作付けが期待されているため、復元可能な農地にて資源作物を栽培し、その作物からエタノールを生産すると想定した。

各都道府県ではデンプン系の米、小麦、大麦、サツマイモ、ジャガイモ、トウモロコシ、油質系的大豆、ナタネ、ヒマワリ、糖質系のでん菜、サトウキビ、スイートソルガムの資源作物が栽培されている¹²⁾。本稿では、現在栽培されている資源作物は、気象や土壌など栽培条件上で栽培可能な作物と考え、水田では水稻を栽培すると仮定し、畑地では水稻以外の作物が栽培可能であると仮定した。ただし、でん菜、サトウキビについては、栽培条件の影響が大きいためでん菜は北海道、サトウキビは鹿児島県、沖縄県のみ栽培とした¹³⁾。以下は水田、畑地でのエタノール生産ポテンシャルの算出法を説明する。まず、都道府県別の玄米収量¹²⁾、玄米からのエタノール収率¹³⁾より都道府県別の玄米からのエタノール回収量を算出した。都道府県別の即利用可能・利用可能な水田面積¹¹⁾に、算出した玄米からのエタノール回収量を乗じて水田のエタノール生産ポテンシャルを推計した。次に畑地では栽培可能な各作物の収量¹²⁾、各作物からのエタノール収率¹³⁾⁻¹⁴⁾を用いて都道府県別の各資源作物のエタノール回収量を算出した。そのうちエタノール回収量が最大となる作物を栽培することを想定し、都道府県別の即利用可能・利用可能な畑地面積¹¹⁾に、最大のエタノール回収量を乗じて畑地のエタノール生産ポテンシャルを推計した。樹園地は本稿の対象外とした。

4. 福島県におけるエタノール生産システムの検討

福島県における耕作放棄地面積は全国 1 位で、2005 年では約 17,520ha¹¹⁾であった。そのうち、農地への復元可能な水田面積は約 4,554ha（即利用可能な面積 870ha，利用可能な面積 3,684ha）で、畑地面積は 8,853ha（即利用可能な面積 1,523ha，利用可能な面積 7,330ha）で、年々増加傾向にある。耕作放棄地の解消にあたっては、耕作放棄地を地域の大切な資源と捉え、農地への復元可能な耕作放棄地の解消を最優先に取り込むことが重要である。また、バイオ燃料導入の一つの目的は地球温暖化対策であり、生産されるバイオ燃料のライフサイクルに亘る温室効果ガス（Greenhouse Gas，以下、GHG と略記）の排出量の検討が必要である。本稿では農地（田畑）への復元可能な耕作放棄地で栽培した資源作物からエタノールを製造することを想定して、GHG 排出量の最小となるエタノール生産・利用システムを検討する。

東日本震災で津波による流失・冠水や福島第一原発事故に伴う放射性物質汚染などが即利用可能な農地、利用可能な農地への影響は大きい。現地データが入手できないため、本稿では、東日本震災で津波による流失・冠水などの被害や福島第一原発事故に伴う放射性物質汚染の被害が考慮されていない。

(1) 解析フロー

現在エタノール生産用の原料として、福島県で作付け可能性のある資源作物は、多収量米、麦類、サツマイモ、ジャガイモ、トウモロコシ、大豆、ナタネ、ヒマワリ、スイートソルガムが考えられる¹²⁾。このうち多収量米は、既存品種より収量が多いことや、耕作放棄地において水田機能を維持することが可能になること、多くの農家が栽培方法を習得していること、既存の生産設備が使えることなどの有利性を持つ。さらに、国などにおいて多収量米、稲わらなどに注目した技術開発が進められていることなどから、水田への復元可能な農地にて多収量米を栽培すると想定している。また、福島県における各資源作物の収量¹³⁾、各資源作物からのエタノール収率^{13)・14)}を考慮した上、畑地への復元可能な農地にてエタノール回収量の高く、生育が早く（4 ヶ月弱）、温度適応性が広く、土壌の適応範囲が広いスイートソルガム¹⁵⁾を栽培すると想定している。

解析フローを図-2 に示す。①エタノール生産・利用システム境界を設定する。②資源作物の発生量・分布、利用可能な耕作放棄地の分布、資源作物やエタノールの輸送距離、エタノールの利用先（バイオガソリン精製所、

図-2 解析フロー

以下、精製所と略記）の分布など地域属性データおよび各プロセスのインベントリデータを整備する。③目的関数および制約条件を設定し、最適化モデルを構築する。モデル作成に際して、ケーススタディーを行う福島県を対象にしてデータの設定を行い、さらに県としての施策決定に役立てるという観点から、市町村（89）を単位に設定した。本稿では GHG 排出量の最小化を目的関数として設定し、資源作物の発生量およびエタノール製造プラント（以下、プラントと略記）規模のバランスを考慮しながら、最適化解析を行う。解析項目は、プラント基数、立地場所、資源作物およびエタノールの輸送経路・輸送量、GHG 排出量とする。最適化計算には、汎用最適化ツール GAMS（General Algebraic Modeling System）¹⁶⁾を用いて解析した。資源作物の発生量・分布、資源作物およびエタノールの輸送距離、エタノール生産に係る各プロセスのインベントリデータ、精製所の分布などのデータを整備し、エタノール生産・利用システムの最適化モデルを構築することで、地域的な制約条件を考慮しながら GHG 排出量の最小化を目的としたプラント立地、資源作物・エタノールの輸送経路や GHG 排出量を算出することができる。この解析を行うことで、地域における最適なエタノール生産システム案を検討できる。以下は解析条件について説明する。

(2) エタノール生産・利用システム概要

図-3 に利用可能な（即利用可能・利用可能）耕作放棄地を活用する場合、エタノール生産・利用システム概要を示す。図-3 に示すように、GHG 排出量算定におけるバウンダリは、直接的土地利用変化、原料栽培、原料収

図-3 エタノール生産・利用システム概要

集、燃料製造、燃料輸送（精油所まで）の各工程を算定対象とする²⁰⁾。土地利用変化の種類は、直接的土地利用変化と間接的土地利用変化が存在しているが、本稿では直接的土地利用変化のみ考慮されている²¹⁾。資源作物からエタノール生産における各段階のほか、水田・畑地への復元可能な耕作放棄地の転換、および多収量米、スイートソルガムの栽培段階が考慮されている。水田への復元可能な耕作放棄地にて多収量米を作付し、粗玄米をエタノール製造に利用し、籾殻・稲わらの両方をエタノール製造時の熱源として利用すると想定した。また、畑地への復元可能な耕作放棄地にてスイートソルガムを栽培し、スイートソルガムをエタノール製造に利用する。収穫した茎を圧搾して搾汁液を取り、酵母によるエタノール発酵を行い、エタノールを製造する。搾汁残渣（バガス）、トラッシュ（穂や葉）および発酵残渣は家畜の飼料として利用できるが、福島県の放射線汚染のことを考慮し、エタノール製造の熱源として利用するとした。

粗玄米からのエタノール製造は、糖化、発酵、蒸留のプロセスからなり、JA 新潟県の製造工程を参考にした¹⁷⁾。スイートソルガムからのエタノール製造は、茨城大学のプロジェクトの製造工程を想定した¹⁸⁾。製造されたエタノールを精油所でガソリンと混合して（エタノールの体積割合を 3%とする）、自動車燃料として利用すると想定した。評価はプロセスの運用段階だけでなく、プラント建設段階、収集・輸送車両の製造段階が考慮されている。

このシステムは資源作物生産側、エタノール製造側、エタノール需要側から構成される。資源作物生産側、プラント、精油所はすべて県内に存在し、バイオマス発生から変換、消費までを県内行うことを想定し、地産地消型小規模システムの構築を検討している。また、地産地消型利用システムを検討するため、プラント、精油所は同じ市町村に立地すると設定した。

(3) 入力データの整備

a) 地域属性データ

地域的なエタノール生産・利用システムを検討するためには、対象地域における資源作物の発生量・分布や、エタノール需要側の精油所の分布などを考慮する必要がある。また、資源作物の発生場所、プラント立地、精油所を結ぶ輸送活動が必要となり、資源作物の発生源からプラントまで、プラントから精油所までの輸送距離を整理する必要がある。そこで、地域属性データとしては、資源作物の発生量・分布、精油所の分布、市町村間の道路距離、プラントから精油所までの道路距離などを地理情報システム（Geographic Information System, 以下、GIS と略記）を用いて整備し

た（表-1）。水田への復元可能な耕作放棄地面積、多収量米の収量を用いて粗玄米、もみ殻、および稲わらの発生量を GIS 上に整備した。また、畑地への復元可能な耕作放棄地面積にスイートソルガムを 1 期作（6 月栽培、9 月収穫）栽培すると仮定し、スイートソルガムの発生量を推計した。推計方法および使用データを表-1 にまとめた。水田への復元可能な耕作放棄地を利用して多収量米を栽培し、粗玄米 35,520t、もみ殻 6,020t、稲わら 24,590t を生産できると推計された。畑地への復元可能な耕作放棄地にてスイートソルガム 469,200t を生産できると推計された。図-4、図-5 に福島県における田畑への復元可能な耕作放棄地の活用による粗玄米、スイートソルガムの発生量・分布を示す。数値地図 25,000 空間基盤（福島県）¹⁹⁾を用いて市町村代表点間の最短道路距離を資源作物の輸送距離として算出した。なお、市役所、町役場、村役場を市町村代表点とした。また、同じ市町村にプラントと精油所を立地すると設定したため、エタノール輸送距離はゼロとみなし、勘定しないこととした。

b) プロセスインベントリデータ

エタノール収率については、多収量米は新潟 JA の事例¹²⁾を参考に 450L/t 粗玄米とした。スイートソルガムからのエタノール収率は、ソルガム茎の搾汁率（50%）、ソルガム搾汁液の糖含有率（14%）、糖からのエタノール生成比率（51.4%）、アルコール発酵歩合（85%）より 40L/t と推計した²¹⁾。エタノールプラントの最適な規模については、原料調達費（栽培費、原料購入費、原料収集輸送費）⁸⁾⁹⁾とプラントの減価償却費とのトレードオフ関係を考慮しながらエタノール生産 1L あたりの費用が最小となるプラント規模を検討した。プラント規模の算出方法は前報⁸⁾を参照されたい。本稿では、粗玄米、スイートソルガムをエタノールの原料とするため、粗玄米、スイートソルガムの栽培費、収集輸送費の合計費用を原料調達費とした。プラントの最適な規模は、設備費曲線と原料調達費曲線の合計の最小値で決定され、5,000kL/年と推計された。

表-1 利用されたデータ

項目		算出方法	使用データ・出典
発生量	粗玄米	水田面積×粗玄米収量	粗玄米収量：7.8t/ha ¹⁷⁾
	もみ殻	水田面積×〔(粗玄米収量÷粗玄米粒数歩合)×(1-粗玄米粒数歩合)〕	粗玄米粒数歩合：85.5% ¹²⁾
	稲わら	水田面積×稲わら発生量	稲わら発生量：5.4t/ha ²⁰⁾
	スイートソルガム	畑地面積×スイートソルガム収量	スイートソルガム収量：53t/ha ¹²⁾
輸送距離	発生源-プラント	市町村代表点間の最短距離として算出	
	プラント-精油所	ゼロと仮定

図-4 粗玄米の発生量（農業集落単位）

図-5 スイートソルガムの発生量（農業集落単位）

表-2 に GHG 排出量を直接的土地利用変化、原料栽培、原料収集輸送、エタノール製造、エタノール輸送、およびエタノール使用に分けてまとめた。直接的土地利用変化は、本稿では水田・畑地への復元可能な耕作放棄地から農地への土地転換を想定した。土地利用変化に伴う GHG 排出量については、土地転換前後の炭素ストック量の変動を計上しなければならない、EU 指令では、森

表-2 インベントリデータ

プロセス・項目		GHG排出原単位		出典・備考
		値	単位	
直接的土地利用変化		-29	g-eqCO ₂ /MJ	22)
原料栽培	多収量米（即利用可能） （水管理状態の変化を伴う水田）	0.524	kg-eqCO ₂ /kg	22)
	多収量米（利用可能） （水管理状態の変化を伴う水田）	0.573	kg-eqCO ₂ /kg	22) より算出
	スイートソルガム （即利用可能）	0.040	kg-eqCO ₂ /kg	23) より算出
	スイートソルガム （利用可能）	0.044	kg-eqCO ₂ /kg	23) より算出
原料収集輸送	玄米	0.000494	kg-eqCO ₂ /kg・km ⁵⁾	
	スイートソルガム	0.000176	kg-eqCO ₂ /kg・km ²³⁾	より算出
エタノール製造	建設	463	t-CO ₂ /年	6), 8)
	運用（玄米）	0.135	kg-eqCO ₂ /kg	5)
	運用（スイートソルガム）	0.0018	kg-eqCO ₂ /kg	7)
エタノール輸送		0	kg-eqCO ₂ /L・km	22)
エタノール使用による削減量		1.794	kg-eqCO ₂ /L	22)

林または草地から農地への転換の場合、地上・土壌中の炭素ストック変化を 20 年に均等配分して計上、荒廃または汚染されている土地での原料栽培の場合、29gCO₂eq/MJ をバイオ燃料の GHG 排出量から控除可能と設定している。一方、「バイオ燃料導入に係る持続可能性基準等に関する検討会中間とりまとめ」において、荒廃地や汚染地、放棄地で原料栽培された場合一定のボーナスを付与し、バイオ燃料の GHG 排出量から控除可能であると検討されているが、日本での GHG ボーナス付与の判断基準は検討されていない。本稿では耕作放棄地を活用して GHG 排出量の少ないエタノール生産・利用システムを検討するため、耕作放棄地を荒廃地と仮定し、EU 指令²³⁾中の数値に基づき耕作放棄地でのバイオ燃料の原料栽培に対するボーナスを考慮した。また、即利用可能な水田の中に調整水田（水を張っている休耕田）が含まれていると考えられるが、そのデータが入手できないため、本稿では即利用可能・利用可能な水田を水を張っていない休耕田とし、多収量米栽培の GHG 排出原単位は水管理状態の変化を伴う水田の排出原単位を使用した。肥料の製造や施肥に伴う N₂O 排出についてはデータが足りないため考慮されていない。即利用可能な耕作放棄地は草刈りで直ちに耕作することが可能であるのに対して、利用可能な耕作放棄地は基盤整備を実施してから耕作できると定義されているため、原料栽培段階における GHG 排出量を文献より推計した。また、比較対象となる化石燃料はガソリンとし、81.7gCO₂eq/MJ をガソリンのライフサイクル GHG として用いた。

(4) 最適化モデルの構築

a) 目的関数

バイオ燃料の利用は温暖化対策の一方策となるため、本稿では地球温暖化に注目して GHG 排出量の最小化を目的関数として設定した。ただし、エタノールの燃焼による二酸化炭素はカーボンニュートラルであるため計上していない。以下は目的関数の定式化を説明する。

Minimization

$$GHG = GLC + GCU + GTB + GIN + GOM + GTE - RES \quad (式 1)$$

直接的土地利用変化：

$$GLC = \sum_m \sum_n \sum_j (WB_{n,m,j} \div ER_j \times RLC_j) \quad (式 2)$$

原料栽培段階：

$$GCU = \sum_m \sum_n \sum_j (WB_{n,m,j} \times GFCU_j) \quad (式 3)$$

原料収集輸送段階：

$$GTB = \sum_m \sum_n \sum_j (WB_{n,m,j} \times G_TRNB_j \times DSTP_{n,m}) \quad (式 4)$$

プラント建設段階：

$$GIN = \sum_m (CAP_m \times (1 - RV) \div LT \times GMU) \quad (式 5)$$

運用段階：

$$GOM = \sum_m \sum_n \sum_j (WB_{n,m,j} \times GOC) \quad (式 6)$$

エタノール輸送段階：

$$GTE = \sum_i \sum_m \sum_n \sum_j (WB_{n,m,j} \times EY_j \times G_TRNE \times DSTE_{m,i}) \quad (式 7)$$

エタノール使用段階：

$$RES = \sum_m \sum_n \sum_j (WB_{n,m,j} \times EY_j \times RESP) \quad (式 8)$$

ここで GHG はエタノール利用システムにおける GHG 排出量を表し、直接的土地利用変化、原料栽培、原料収集輸送、プラント建設、運用、エタノール輸送の各段階での合計 GHG 排出量からエタノール使用による GHG 排出削減量を差し引いて求める（式 1）。直接土地利用変化による GHG 排出量は、原料の発生量、原料収量および単位面積あたりの直接的土地利用変化による GHG 排出原単位²⁹より算出する（式 2）。原料栽培段階における GHG 排出量は原料の発生量、原料単位質量あたりの GHG 排出原単位を用いて算出する（式 3）。原料収集輸送段階における GHG 排出量は原料の発生量、単位距離あたりの原料輸送 GHG 排出原単位、市町村からプラントまでの道路距離より算出する（式 4）。プラント建設段階における GHG 排出量は、それが建設された時

点でしか排出されないため、プラントの減価償却費に、プラント建設時 GHG 排出原単位を乗じて算出した GHG 排出量を、それぞれの 1 年間の利用に伴い間接的に排出される GHG 排出量と想定した（式 5）。プラント運用段階における GHG 排出量は、原料量に単位処理量あたり GHG 排出原単位を乗じて算出する（式 6）。エタノール輸送段階における GHG 排出量は、原料量、エタノール収率、単位距離あたりのエタノール輸送 GHG 排出原単位、プラントから精油所までの距離より算出する（式 7）。エタノール使用による GHG 排出削減量は、エタノール生産量、エタノール使用による GHG 排出削減原単位より求める（式 8）。

b) 制約条件

制約条件としては、資源作物供給量はプラント規模を満たすことを考慮した（式 9）。

$$\sum_n \sum_j BSW_{n,j} \geq \sum_m AP_m \quad (式 9)$$

上述の目的関数、制約条件をモデルに入力して最適解析を行った。各式中の記号を表-3に示す。

c) シナリオ設定

耕作放棄地を活用してより現実的にエタノール生産・利用システムを設計・評価するため、水田・畑地への即

表-3 各式中の記号

記号	意味	単位
n	原料発生場所(市町村)	
m	プラント立地(市町村)	
i	給油所場所	
j	原料(資源作物)	
WB _{n,m,j}	市町村nからプラントmへj資源作物の輸送量	t/年
GHG	GHG排出量	t-CO ₂ /年
GLC	直接土地利用変化によるGHG排出量	t-CO ₂ /年
GCU	原料栽培段階におけるGHG排出量	t-CO ₂ /年
GTB	原料収集輸送段階におけるGHG排出量	t-CO ₂ /年
GIN	プラント建設段階におけるGHG排出量	t-CO ₂ /年
GOM	運用段階におけるGHG排出量	t-CO ₂ /年
GTE	エタノール輸送段階におけるGHG排出量	t-CO ₂ /年
RES	エタノール使用によるGHG削減量	t-CO ₂ /年
RLC _j	直接的土地利用変化によるGHG排出原単位	t-CO ₂ /ha
GFCU _j	原料栽培段階で単位質量あたりのGHG排出原単位	t-CO ₂ /t
G_TRNB _j	単位距離あたりの原料輸送GHG排出原単位	t-CO ₂ /t・km
GMU	プラント建設時GHG排出原単位	t-CO ₂ /万円
GOC	単位処理量あたりのGHG排出原単位	t-CO ₂ /t-原料
G_TRNE	単位距離あたりのエタノール輸送GHG排出原単位	t-CO ₂ /kL・km
RESP	エタノール使用によるGHG排出削減原単位	t-CO ₂ /kL
BSW _{n,j}	市町村nにおける原料発生量	t/年
ER _j	原料収量	t/ha
CAP _m	プラント建設費	万円
RV	プラント残存価値	%
LT	プラントの耐用年数	年
AP _m	プラント規模	kL/年
DSTP _{n,m}	市町村とプラント間の距離	km
DSTE _{m,i}	プラントと製油所間の距離	km
EY _j	エタノール収率	kL/t-原料

利用可能な耕作放棄地，利用可能な耕作放棄地に分けて，計4シナリオの解析を行う．下記の文・図表の中には，即利用可能（水田），利用可能（水田），即利用可能（畑地），利用可能（畑地）と略記する．

5. 解析結果と考察

(1) 耕作放棄地活用によるエタノール生産ポテンシャル

草刈りなどにより直ちに耕作できる水田や畑地にて資源作物を栽培し，その資源作物から約16万kLのエタノールが生産できる．農業用水路・排水路，道路など基盤整備を実施することにより耕作できる土地で資源作物を栽培してエタノールを生産する場合，約38万kLのエタノールを生産することができる．両者を合わせた生産量は，日本のガソリンの年間消費量の0.9%（熱量換算）にあたる²³⁾．多くの地域において畑地で栽培された作物は収量の高いスイートソルガム（収量：50～90t/ha，エタノール収率：40L/t），およびエタノール収率の高いトウモロコシ（収量：6～13t/ha，エタノール収率：340L/t）が選択された．北海道地域で収量の高いてん菜（収量：68t/ha，エタノール収率：83L/t）が選択された．図-6に都道府県別のエタノール生産ポテンシャルを示す．北海道地域ではエタノール潜在生産量が一番高い．これは耕作放棄地面積も栽培されたてん菜の収量も高いためである．また，関東地域における耕作放棄地面積が大きいためエタノール生産ポテンシャルが高いことがわかった．

(2) 福島県におけるエタノール生産・利用システム

a) エタノール生産ポテンシャル

福島県における農地への復元可能な耕作放棄地にて多収量米，スイートソルガムを栽培し玄米とスイートソルガムからエタノールを製造する場合，約3.5万kLのエタノールが生産できると推計された．これは福島県における年間自動車ガソリン消費量の約1.66%（熱量換算）に相当する²⁴⁾．エタノール使用によるGHG排出削減効果が大きく寄与して年間約3.2万t-CO₂eq削減できると推計された．

b) プラント基数・立地場所

年間エタノール生産量5,000kL規模のプラントを導入する場合，プラント立地場所，導入基数，および原料の輸送経路・輸送量の解析結果を表4に示す．1列目と10列目欄の数字は福島県における市町村（89）コードである．2行目欄の数字はプラントを導入する場所（市町村）を表す．表4に示されたように，プラント導入基数は，即利用可能（水田）1基，利用可能（水田）3基，即利用可能（畑地）1基，利用可能（畑地）3基となっ

図-6 都道府県別のエタノール生産ポテンシャル

た．また，表中の数値は，各市町村からプラントまでの原料の輸送量を表す．

c) GHG排出量

表5に各シナリオのGHG排出量を直接的土地利用変化，原料栽培，収集輸送，原料購入，エタノール製造，エタノール輸送およびエタノール使用のプロセスに分けて示す．エタノール生産1LあたりのGHG排出量は，即利用可能（水田）シナリオでは約1.02kg-CO₂eq，利用可能（水田）シナリオでは約1.08kg-CO₂eq，即利用可能（畑地）シナリオでは約0.7kg-CO₂eq，利用可能（畑地）シナリオでは約0.73kg-CO₂eqであった．即利用可能な耕地は草刈りで直ちに耕作することが可能であるのに対して，利用可能な耕地は基盤整備を実施してから耕作できると設定したため，即利用可能シナリオより利用可能シナリオは原料栽培段階におけるGHG排出量が多い．エタノール使用によるGHG削減量を考慮すれば，各シナリオではGHG削減効果がみられ，エタノール生産1LあたりのGHG排出量が約0.7～1.2kg-CO₂eqとなった．粗玄米，スイートソルガムの収集輸送原単位が異なるため，水田シナリオより畑地シナリオのGHG排出量が多かった．また，原料が異なるためエタノール製造段階におけるGHG排出が異なり，水田シナリオでは約0.3kg-CO₂eq/L，畑地シナリオでは約0.04kg-CO₂eq/Lとなった．GHG排出量内訳をみると，各シナリオでは，原料栽培段階におけるGHG排出量は約70%～80%を占めており，もっとも多かった．ガソリンに対するGHG排出削減率は，即利用可能（水田）シナリオでは約43%，利用可能（水田）シナリオでは約40%，即利用可能（畑地）シナリオでは約61%，利用可能（畑地）シナリオでは約59%となり，多収量米よりスイートソル

表-4 プラント立地・導入基数・原料輸送量

単位：t

立地場所		利用可能 (水田)				利用可能 (畑地)				立地場所		利用可能 (水田)				利用可能 (畑地)			
市町村コード	7325	7424	7503	7308	7326	7203	7522	7307	市町村コード	7325	7424	7503	7308	7326	7203	7522	7307		
7364	0	0	0	0	0	806	0	0	7210	546	0	0	439	6,480	11,700	0	0		
7367	0	191	0	0	12	1,050	0	0	7504	145	0	257	0	574	0	2,430	0		
7365	0	37	0	0	32	1,150	0	0	7482	22	0	70	0	700	0	1,340	0		
7445	14	246	0	0	7	1,410	0	0	7502	48	0	285	0	864	0	8,030	0		
7363	0	325	0	0	0	5,240	0	0	7324	81	342	0	0	603	7,630	0	0		
7366	1	109	0	0	6	840	0	0	7483	0	0	5	0	0	0	119	0		
7444	37	16	0	0	1,590	1,250	0	0	7501	0	0	491	0	280	0	10,400	0		
7446	78	158	0	0	143	1,970	0	0	7321	38	0	0	277	234	0	0	10,400		
7405	76	603	0	0	1,100	7,830	0	0	7521	21	138	0	0	2,190	3,340	0	0		
7423	57	93	0	0	136	1,610	0	0	7301	86	0	0	83	1,230	0	0	870		
7361	0	648	0	0	0	8,050	0	0	7302	0	0	0	7	2	0	0	511		
7406	0	129	0	0	15	2,050	0	0	7484	0	0	61	0	0	0	271	0		
7404	0	343	0	0	0	1,540	0	0	7309	178	0	0	27	2,600	0	0	1,960		
7443	1	28	0	0	121	420	0	0	7303	84	0	0	100	406	0	0	703		
7441	48	143	0	0	295	1,010	0	0	7305	79	0	0	197	1,920	0	0	4,240		
7421	21	38	0	0	54	432	0	0	7503	95	0	522	0	1,110	0	5,600	0		
7401	4	105	0	0	131	1,470	0	0	7326	451	0	0	728	6,680	0	0	12,900		
7362	39	478	0	0	23	5,970	0	0	7325	48	0	0	784	0	0	6,890	1,080		
7422	0	0	0	0	42	60	0	0	7505	110	0	599	0	1,790	0	2,050	0		
7442	24	57	0	0	14	423	0	0	7527	147	0	0	613	3,580	0	20,700	0		
7208	11	342	0	0	9	4,280	0	0	7522	66	0	549	0	586	0	4,950	0		
7403	6	30	0	0	33	2,740	0	0	7307	24	0	0	301	123	0	0	6,000		
7424	0	109	0	0	0	557	0	0	7308	562	0	0	395	8,190	0	0	6,860		
7202	0	374	0	0	22	2,740	0	0	7304	102	0	0	336	1,940	0	0	9,610		
7407	0	63	0	0	1	2,760	0	0	7306	27	0	0	511	1,810	0	0	14,800		
7402	0	65	0	0	0	1,510	0	0	7524	23	0	212	0	315	0	3,030	0		
7344	25	139	0	0	79	3,400	0	0	7526	35	0	0	355	553	0	5,240	0		
7461	0	220	0	0	0	182	0	0	7523	0	0	231	0	187	0	1,380	0		
7408	0	72	0	0	417	2,110	0	0	7564	112	0	0	233	2,970	0	0	4,070		
7467	0	59	0	0	51	156	0	0	7548	5	0	0	50	14	0	0	1,260		
7341	12	166	0	0	29	1,430	0	0	7525	0	0	0	247	0	0	1,750	0		
7343	29	119	0	0	128	392	0	0	7204	506	0	3,370	0	4,340	0	22,300	0		
7205	0	0	704	0	0	4,260	686	0	7544	0	0	166	0	0	0	1,630	0		
7462	0	0	314	0	0	0	0	0	7547	331	0	0	302	1,970	0	0	3,160		
7203	218	2,640	0	0	1,990	32,400	0	0	7209	260	0	0	819	891	0	0	8,260		
7464	0	0	19	0	0	1,470	0	0	7561	54	0	0	155	673	0	0	4,870		
7322	432	0	0	0	2,460	26	0	0	7206	27	0	0	540	930	0	0	6,940		
7481	24	0	202	0	409	0	2,830	0	7562	33	0	0	164	467	0	0	2,150		
7466	40	0	210	0	493	0	3,600	0	7545	55	0	0	292	431	0	881	0		
7342	18	0	239	0	180	1,430	0	0	7542	30	0	0	125	105	0	2,900	0		
7463	7	0	51	0	0	0	454	0	7563	235	0	0	308	1,620	0	0	3,290		
7465	6	0	105	0	126	0	1,550	0	7541	4	0	0	162	0	0	965	0		
7323	62	182	0	0	520	1,000	0	0	7543	254	0	0	261	189	0	930	0		
7201	373	192	0	794	9,690	0	0	26,100	7546	23	0	0	390	56	0	807	0		
7207	176	0	1,070	0	753	0	14,700	0											

表-5 GHG 排出量

GHG排出量	即利用可能 (水田)	利用可能 (水田)	即利用可能 (畑地)	利用可能 (畑地)
原料栽培	3,556	16,500	3,228	17,091
原料収集・輸送	140	491	521	2,218
エタノール製造（プラント建設）	463	1,389	463	1,389
エタノール製造（運用）	916	3,879	145	699
エタノール使用による削減量	-5,471	-23,200	-5,865	-28,229
直接的土地利用変化	-1,945	-8,235	-2,082	-10,019
GHG排出量 (t-CO ₂ e) (土地利用変化・ボーンラス考慮有)	-2,341	-9,176	-3,589	-16,851
GHG排出量 (t-CO ₂ e) (土地利用変化・ボーンラス考慮無)	-396	-942	-1,507	-6,832
GHG排出量 (kg-CO ₂ e/L) (土地利用変化・ボーンラス考慮有)	1.02	1.08	0.70	0.73
GHG排出量 (kg-CO ₂ e/L) (土地利用変化・ボーンラス考慮無)	-0.77	-0.71	-1.11	-1.08
ガソリンに対する削減率 (%) (土地利用変化・ボーンラス考慮有)	43%	40%	61%	59%
ガソリンに対する削減率 (%) (土地利用変化・ボーンラス考慮無)	7%	4%	25%	23%

ガムからエタノール生産の優位性が高かった。「バイオ燃料導入に係る持続可能性基準等に関する検討会中間とりまとめ」においてガソリン比 50%以上の GHG 排出削減が目安とされているが、現時点では GHG 削減率 50%の目標が達成できるものは余剰てん菜と建築廃材のみである²²⁾。本稿での設定条件のもとで、即利用（畑地）シナリオ、利用可能（畑地）シナリオのガソリンに対する GHG 排出削減率が 50%以上という結果が得られたが、実際のバイオ燃料生産では 50%以上の目標達成が困難となる可能性がある。また、米からエタノール生産の場合は水田からの CH₄ 排出を考慮すると、ガソリン比 50%以上の削減率の達成がもっと困難であると考えられる。ただし、国産バイオ燃料については実証段階であり、今後実用化や商用化による経済性の追求が進むことによる効率向上などが期待される。

6. まとめ

農地への復元可能な耕作放棄地の活用によるエタノール生産のポテンシャルを推計した。また、福島県を対象地域にし、水田・畑地への復元可能な耕作放棄地の活用によるエタノール生産・利用システムの検討を行い、GHG 排出量が最小化となるシステムを提案した。その結果、以下のことが判明した。①水田や畑地への復元可能な耕作放棄地にて資源作物物を栽培し、その資源作物から約 54 万 kL のエタノールが生産できる。これは日本のガソリン年間消費量の 0.9% (熱量換算) にあたる。②福島県における水田・畑地への復元可能な耕作放棄地にて多収米量およびスイートソルガムを栽培して年間約 3.5 万 kL のエタノールが生産でき、約 3.2 万 t-CO₂eq 削減できる。③多収米量よりスイートソルガムからエタノール生産の GHG 排出削減の優位性が高かった。

今後は耕作放棄地の活用を考慮しながらエタノール生産・利用システムの経済性、環境影響を検討する。福島県では東日本大震災で津波による流失・冠水などの被害を受けた農地面積が大きい。加えて、福島第一原発事故に伴う放射性物質の飛散による農業への影響も高い。復興に際しては、被災農地を回復するとともに耕作放棄地の活用を検討することが今後の課題である。また、放射能汚染された農地で栽培された資源作物を利用してバイオ燃料をつくる際、残渣や排出ガス中の放射性物質の扱いも重要な課題である。

参考文献

- 1) バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議：国産バイオ燃料の大幅な生産拡大，入手先<http://www.maff.go.jp/j/press/2007/pdf/20070227press_1b.pdf>，（参照 2012-06-20）
- 2) 田中信世：EU のバイオ燃料政策エタノールをめぐる状況，国際貿易と投資 Winter, No.70, 56-73, 2007.
- 3) 農林水産省：耕作放棄地の現状について，入手先<http://www.maff.go.jp/j/nousin/tikei/houkiti/pdf/genjou_1103r.pdf>，（参照 2012-06-20）
- 4) 朝野健司，美濃輪智朗：日本におけるバイオエタノールの生産コストと CO₂ 削減コスト分析，Journal of Japan Institute of Energy, 86 (12)，pp.957-963, 2007.
- 5) 佐賀清崇，横山伸也，芋生憲司：稲作からのバイオエタノール生産システムのエネルギー収支分析，Journal of Japan Society of Energy and Resources, 29 (1)，pp.30-35, 2007.
- 6) 楊翠芬，勾坂正幸：稲わらからのバイオエタノール生産システムに関する評価，日本 LCA 学会誌, 5 (4)，pp.501-509, 2009.
- 7) 島崎洋一，長坂克彦，恩田匠，小澤雅之：未利用農産物か

らのバイオ燃料製造に関する可能性評価-山梨県中央市を対象にしたケーススタディー，Journal of the Japan Institute of Energy, 88 (11)，pp.1002-1008, 2009.

- 8) 楊翠芬，玄地裕，勾坂正幸：耕作放棄地利用を考慮したバイオエタノール生産プロセスのコスト・環境負荷の評価，日本 LCA 学会誌, 7 (3)，pp.281-291, 2011.

- 9) 高橋溪，大山尚宏，出口裕一郎，中田俊彦：復元可能な遊休農地を活用するバイオエタノール生産システムの設計，Journal of the Japan Institute of Energy, 89 (4)，pp.355-363, 2010.

- 10) 農林水産省：かけがえのない農地を守るために－耕作放棄地対策推進の手引き－，入手先<<http://www.maff.go.jp/j/nousin/tikei/houkiti/pdf/tebiki01.pdf>>，（参照 2012-06-20）

- 11) 全国農業会議所：遊休農地対策データベース，入手先<<http://www.nca.or.jp/Nochi/yukyu-db/Download/mokuji.htm>>，（参照 2011-08-24）

- 12) 農林水産省大臣官房統計部：作物統計（普通作物・飼料作物・工芸農作物），2005.

- 13) 大聖泰弘：バイオエタノール最前線，工業調査会, pp.253

- 14) 資源作物のバイオ燃料生産調査報告書，入手先<http://ogb.go.jp/nousui/kankyoku/baio111212/111212_6.pdf>，（参照 2012-02-24）

- 15) NEI バッサム：エネルギー作物の辞典，恒星社厚生閣, pp.383

- 16) GAMS Development Corporation, Welcome to the GAMS Home Page, GAMS Development Corporation ホームページ，入手先<<http://www.gams.com>>，

- 17) 農林水産省：新しい多収米品種，入手先<http://www.saffric.go.jp/docs/producer/rice/pdf/tasyuumai_p.pdf>，（参照 2012-06-20）

- 18) 茨城大学バイオ燃料社会プロジェクト：入手先<<http://www.ibos.ibaraki.ac.jp/project.html>>，（参照 2012-01-15）

- 19) 国土地理院：数値地図 25000（空間データ基盤）（福島），平成 14 年 12 月 1 日発行.

- 20) NEDO：バイオマス賦存量・利用可能量推計，入手先<<http://app1.infoc.nedo.go.jp/biomass/about/index.html>>，（参照 2012-06-15）

- 21) NPO 亜熱帯バイオマス利用研究センター：平成 22 年度バイオマス資源活用促進事業のうちバイオマス資源利用可能性調査事業実施報告書，平成 23 年 3 月（スイートソルガムのエタノール収率文献）

- 22) 資源エネルギー庁：バイオ燃料導入に係る持続可能性基準等に関する検討会中間とりまとめ，平成 22 年 3 月.

- 23) 内田晋・林清忠ら：エネルギー作物栽培の技術改善がエネルギー効率と地球温暖化に与える影響，第 4 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, pp.304-305, 2009.

- 24) 経済産業省：資源・エネルギー統計，入手先

EVALUATING GREENHOUSE GAS REDUCTION OF BIO-FUELS PRODUCTION SYSTEM UTILIZING FALLOW LAND

Cuifen YANG, Yutaka GENCHI and Masayuki SAGISAKA

In this study, we examined the possibility of the bioethanol production using fallow land. Also, we estimated suitable numbers of bioethanol plants, construction sites of bioethanol plants, transportation routes of energy crops orienting greenhouse gas emissions minimization in Fukushima prefecture. The result shows that energy crops can be grown in the fallow land and the ethanol of about 540,000 kL can be produced in Japan. Multi-yield rice and sweet sorghum are grown in the fallow land and the ethanol of about 35,000 kL can be produced in Fukushima Prefecture, and it can reduce about 32,000t- CO_2eq . The greenhouse gas emissions reduction effect of ethanol production from the sweet sorghum was high than the multi-yield rice.