第 2 章　LCA 分析による温室効果ガス削減効果の計測

林　　岳
増田清敬（滋賀県立大学）
山本　充（小樽商科大学）

１．はじめに

第 1 章ではバイオ燃料を導入することによるさまざまな効果と問題点を取り上げ，その評価手法を提示した。農林水産省の国産バイオ燃料生産に関するモデル実証事業にもみられるように(1)，バイオ燃料は資源稀少国であるわが国においても生産可能なエネルギーとして注目されている。現在のところ日本国内で販売される E3 もしくは ETBE の原料となるバイオエタノールの供給は必要量の確保やコスト面から海外からの輸入に頼らざるを得ない状況にある(2)。確かに単純に国際経済学の比較生産費説に基づくと，わが国のバイオ燃料供給は比較優位を持つ諸外国からの輸入に特化することが望ましいという結論に至る。しかしながら，世界的な地球温暖化対策という観点からみれば，それぞれの国・地域ごとに対策が求められており，貿易に伴う環境負荷排出などの問題も考慮すると，国内におけるバイオ燃料供給は輸入だけではなく国内生産による賄うべきとの意見も根強い。このような議論に際しては，バイオ燃料導入の効果を定量的・客観的に評価することが必要であるが，日本国内の事例についてはこのような評価が不足している状況にある。特に，バイオ燃料導入の一番の目的とも言われている地球温暖化防止の効果については，輸入バイオ燃料および国産バイオ燃料にどの程度の GHG 削減効果があるのかを定量的に把握する必要がある。最近はバイオ燃料の導入が必ずしも地球温暖化防止に貢献しないという見方もあり，OECD においても同様の見解を公式に示している(3)。このような背景のもと，国産バイオ燃料の導入を推進するためはまずはバイオ燃料生産に伴う GHG 排出量を定量的に把握し，バイオ燃料の導入によって地球温暖化防止に間違いなく効果があることを明確に示す必要がある。

そこで，本章ではバイオ燃料の導入に伴う地球温暖化防止効果について，LCA 分析を用いて GHG 削減量を定量的に評価することを目的とする。具体的にはまず国内におけるバイオ燃料生産とブラジルや米国といった海外から輸入されるバイオ燃料の GHG 削減効果の比較を行う。次に国内におけるバイオ燃料生産において，さまざまな GHG 削減技術を導入することで，GHG の削減がどの程度まで可能なのかを明示する。なお，本分析で取り上げるのはバイオ燃料のうちバイオエタノールの生産であり，BDF の生産は取り上げない。

本節に続き，第 2 節では北海道十勝地方における規格外小麦を原料とするバイオエタノ

ール生産を事例として取り上げガソリンに比べた GHG 削減効果を計測し，第３節では耕作放棄地への作付けや簡易耕起栽培，ふん尿スラリーを投入した原料小麦栽培など，GHG を削減するための各種技術を導入した場合の GHG 削減効果を計測する。さらに第４節では，ふん尿スラリーを利用したバイオガスプラントからバイオエタノール生産へエネルギー供給を行った場合の GHG 削減効果を計測し，最後に第５節でこれら各種 GHG 削減技術のうちどれが有効なのかをまとめ結論を導く。

なお，本章での分析は実在するバイオエタノールプラントからの実証データではなく，既存文献から引用したデータによる事前評価であり，本分析で設定したシナリオは実際の事業で計画される生産・流通方式とも異なることをあらかじめ断っておく。

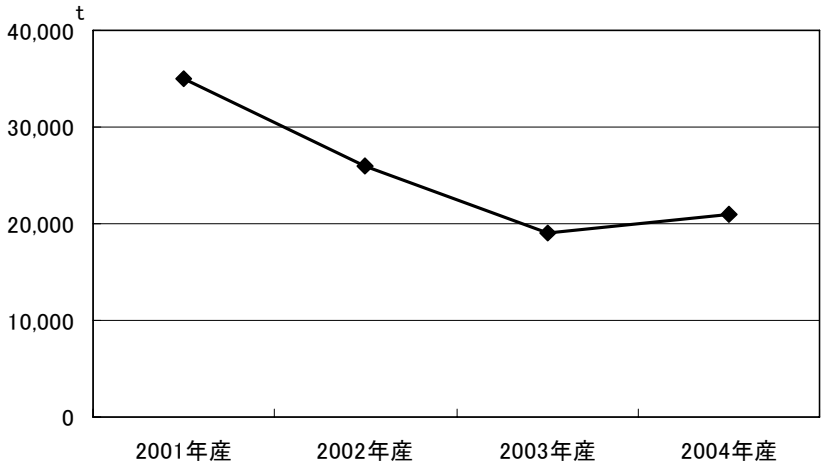
２．規格外小麦を利用したバイオエタノール生産[4]

（１）課題

本節の課題は，国内における小麦を原料としたバイオエタノール生産を事例とし，LCA 分析を用いた GHG 削減効果の評価を試みることである[5]。具体的には，わが国最大の小麦産地である北海道十勝地方における小麦生産により副産物として発生する規格外小麦を原料としてエタノール生産を行う想定事例を設定し，LCA 分析によりエタノール原料作物の生産からエタノールの消費までの GHG を計測して，海外からの輸入バイオエタノールとの比較を試みる。

規格外小麦とは，食用または食品原料用小麦として生産，収穫された小麦のうち品質検査において基準を満たさず食用や食品原料用に適さない小麦のことである。これら規格外小麦は通常飼料用として利用されており，規格に適合した通常の小麦価格のおよそ 1/10 で取引されている。2001 年産から 2004 年産までの十勝地方における規格外小麦の発生量の推移は第１図に示すとおりとなっている。これを見ると，この期間で最も発生量の多かった 2001 年産と最も少なかった 2003 年産では 2 倍弱の差があり，規格外小麦の発生量は天候などの条件により大きく変動することが窺える。規格外小麦は収集性，運搬性，保存性に優れ，比較的安価に利用できることから，近年はバイオエタノールの原料として有力視されており，北海道バイオエタノール株式会社は十勝地方清水町に規格外小麦とてんさいを原料としたバイオエタノール製造プラントの建設を計画し，2009 年の操業開始を目指しているところであり[6]，本節の分析においても北海道バイオエタノール株式会社の清水町でのバイオエタノール製造プラント建設計画を基礎に分析モデルを構築する。

ただし，本分析のデータを収集した 2006 年から 2007 年前半の段階では，実際の計画もまだ未確定部分が多かった。そのため，本分析では環境負荷を最小化するためのモデルを構築し，これによる評価を行う。



第１図　十勝地方における規格外小麦の発生量

出所：十勝圏振興機構(2005)
注 2004 年産は見込み値である.

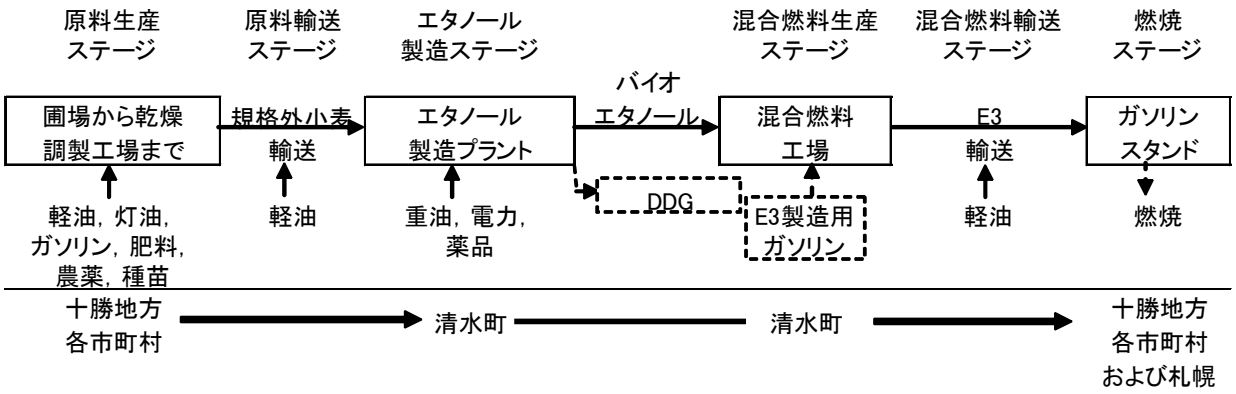
（２）データおよび分析方法

１）分析モデル

第２図は原料生産から燃焼までの６ステージで構成される十勝地方でのバイオエタノール生産モデルのフローである[7]。本モデルでは十勝支庁 20 市町村[8]における小麦生産の結果発生した規格外小麦をすべて清水町のバイオエタノール製造プラントに搬送してバイオエタノールを製造し,バイオエタノール製造プラントに隣接された燃料混合プラントで E3（バイオエタノール 3%混合ガソリン）に加工して，十勝支庁 20 市町村に供給し，余剰分は札幌に輸送して販売すると仮定する[9]。なお，本モデルは北海道バイオエタノール株式会社[10]の清水プラントにおけるバイオエタノール生産計画を基礎としているものの，実際の生産・販売計画では生産されたバイオエタノールを横浜市の精製プラントまで輸送し ETBE に変換した後，全国で販売されることになっており，E3 を十勝地方や札幌のみに供給することや清水町に燃料混合プラントを併設するといった計画はない。しかしながら，本節ではバイオエタノールの地域内供給を優先させたモデルの構築を目指しており，その場合燃料混合のためだけに十勝地方から苫小牧もしくは釧路へ輸送し E3 を再び十勝地方に輸送することはコスト面からも環境面からも効率的ではなく現実的でない[11]。このようなことから，燃料の混合も十勝地方で行うことを想定し，清水プラントに燃料混合施設も併設するというシナリオ設定とした。

LCA 分析により上記モデルにおける各ステージでの GHG 排出量を推計しそれらを集計することで，ガソリンと比較した国産バイオエタノール生産の GHG 削減率を算出する。ただし，混合燃料製造ステージにおける GHG 排出量はデータが得られないため割愛した

(12)。



第2図　十勝地方における規格外小麦原料バイオエタノール生産のモデルフロー

注 [ ] は環境負荷の計測から除外した項目である.
出所：十勝圏振興機構(2005)，北海道農業協同組合中央会ヒアリング調査（2006年12月）.

２）機能単位および環境負荷の配分

本分析における機能単位は自動車で消費される燃料発熱量 1GJ-fuel に設定し，バイオエタノールの発熱量 1GJ-fuel あたりの GHG 排出量を評価する。発熱量は日本化学会（1995）の発熱原単位を用いて推定した。

また，本分析においては，投入財と環境負荷の配分についての検討が必要である。配分とは同一の生産過程から複数の生産物が生産される場合，どの生産物に資源やエネルギー，環境負荷または廃棄物のフローをどれだけ帰属させるかというものである（石谷・赤井（1999））。配分基準には物量基準，経済価値基準などいくつか提唱されているが，これらの詳細は本章補論２で解説する。

第２図に示したモデルの中で配分が生じるステージは３つあり，１つは原料生産ステージにおける規格外小麦と畜産農家向け敷料として系外に持ち出される麦稈間の配分である。ただし，ここでは適当な配分基準を設定できなかったことから，配分は行わないこととした(13)。２つ目はエタノール製造ステージにおけるバイオエタノールと発酵副産物である Distiller's Dried Grains （以下，DDG）の間の配分である。ここでは各生産物の経済的価値比による配分基準を採用し，十勝圏振興機構(2005)における経済価値額を引用しこのステージにおける GHG 量の 88.9%がバイオエタノールに帰属すると仮定した。３つ目に混合燃料配送ステージにおける E3 中のバイオエタノールとガソリン間の配分である。ここでは各生産物の容積比による配分基準を採用し，このステージにおける GHG 量の 3.0%がバイオエタノールに帰属すると仮定した。

３）インベントリ分析

第２図のモデルに従って，第１表のとおり規格外小麦原料のバイオエタノール生産に伴う投入要素および産出要素を特定してその量もしくは金額を算出し（第１表），GHG 量を計測した。本分析で計測対象とした GHG は，軽油，灯油，ガソリン，重油，電力，肥料，種苗，農薬，薬品の直接・間接投入における CO_2 排出量と肥料および麦稈（圃場還元分）の窒素投入における N_2O 排出である。それ以外の種類および発生源の GHG，さらには NOx や SO_2 など他の環境負荷は計算から除外している。

計測した GHG 排出量は地球温暖化係数（GWP）により CO_2 換算し，環境省(2006)に基づき CO_2 1 に対して，N_2O は 310 の CO_2 等量換算で GHG を集計した。

第1表　規格外小麦原料バイオエタノール生産に伴う投入要素および産出要素

ステージ		項目	投入量・額	算出用データ出所
投入	原料生産	軽油	595 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		灯油	544 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		ガソリン	16 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		電力	418,181 kWh	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		肥料	365 百万円	北海道農政部(2005)
		種苗	111 百万円	北海道農政部(2005)
		農薬	129 百万円	北海道農政部(2005)
		肥料窒素	436 tN	北海道農政部(2004)
	原料輸送	軽油	53 KL	三菱総合研究所(2003)，ナビタイムジャパン(online)
	BE製造	電力	4,388,973 kWh	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
		重油	1,901 KL	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
		薬品	63 百万円	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
	E3輸送	軽油	34 KL	三菱総合研究所(2003)，ナビタイムジャパン(online)
産出	原料生産	規格外小麦	24,509 t-原物	農林水産省北海道統計・情報事務所(2006)，十勝圏振興機構(2005)
		麦稈窒素	103 tN	北海道農政部(2005)，農林水産技術情報協会(1996,1997)，松本他(1990)，尾和(1996)
	BE製造	バイオエタノール	10,490 KL	十勝圏振興機構(2005)
		DDG	7,353 t-原物	十勝圏振興機構(2005)
	E3製造	E3	349,668 KL	エタノール混合比率(3%)より計算

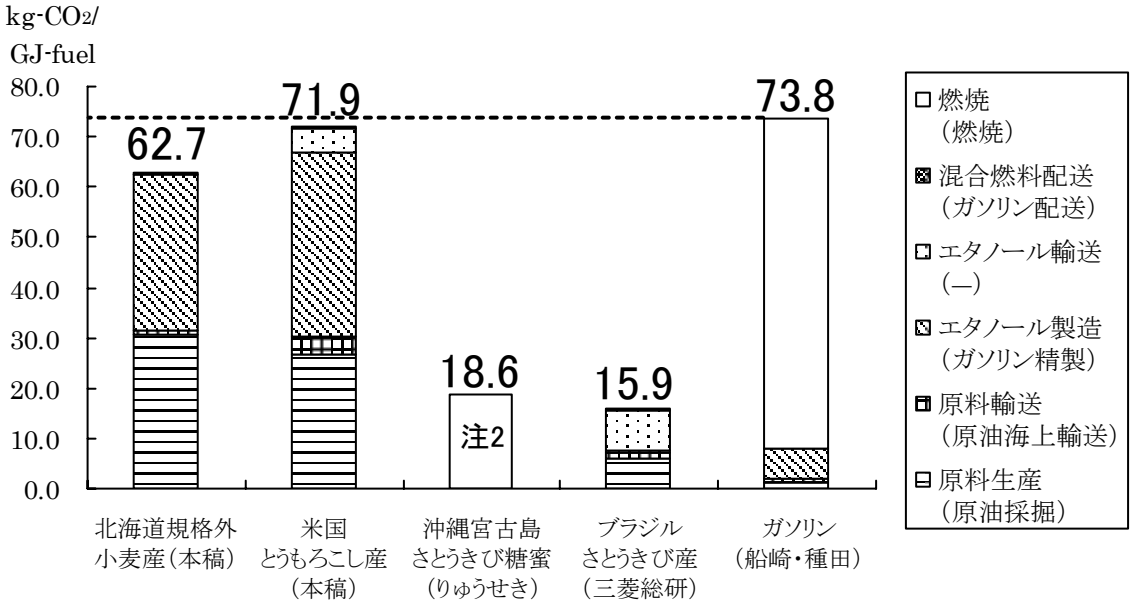
注　投入量・額は副産物との間で環境負荷を配分した後の値である.

（３）分析結果及び考察

本節で評価した十勝地方産規格外小麦原料バイオエタノールの GHG 削減効果について，ブラジル産さとうきび原料バイオエタノール，アメリカ産とうもろこし原料バイオエタノールを日本に輸入した場合と国内におけるガソリン生産との比較評価を試みる。ブラジル産バイオエタノールは三菱総合研究所（2003）が同様の LCA 分析を行っており，これをそのまま引用して比較対象とした。また，アメリカからの輸入については，Pimentel and Patzek(2005)，ガソリンは船崎・種田（1999）の計測結果を引用した。このうち，Pimentel and Patzek(2005)については，アメリカ国内におけるとうもろこしの生産とそれを原料にしたバイオエタノールの LCA 分析であり日本への輸出を考慮した分析ではない。したがって，ここでは Pimentel and Patzek(2005)の結果を引用し，日本までのバイオエタノー

ル輸送を考慮して LCA 分析の結果を修正した。分析結果の修正方法の詳細は本章末尾の補論 1 に示す。

第 3 図および第 2 表に十勝地方産バイオエタノールの LCA 計測結果を示した。これを見ると，十勝地方産バイオエタノールの GHG 排出量は 62.7kg-CO_2/GJ-fuel となっている。また，投入されたエネルギーと産出されたエネルギーでみたエネルギー収支は 1.21 となり，産出されるエネルギーが投入されるエネルギーよりも多く，エネルギー生産としての役割を果たしていることが示された。この結果をガソリンと比較すると，船崎・種田(1999)の結果よりガソリンの GHG 排出量は，73.8 kg-CO_2/GJ-fuel，エネルギー収支は 7.09 となっており，ガソリンに対する十勝地方産バイオエタノールの GHG 削減効果は 14.8%で，エネルギー収支についてはガソリンを大幅に下回る結果となった。



第 3 図　規格外小麦原料バイオエタノール生産の GHG 排出量の計測結果

注 1 沖縄宮古島の事例はりゅうせき内部資料，ブラジルの事例は三菱総合研究所(2003)，ガソリンの事例は船崎・種田(1999)から引用した．
2 沖縄宮古島の事例については，GHG 排出の内訳は不明である．

第2表　ステージ別GHG排出量とエネルギー収支

(kg-CO_2/GJ-fuel)

産地および原料	原料生産（原油採掘）	原料輸送（原油輸送）	燃料製造（精製）	燃料輸送（—）	燃料配送	燃焼（燃焼）	合計	ガソリンからの削減率	エネルギー収支
十勝規格外小麦原料	30.8	0.6	30.9	―	0.5	0.0	62.9	14.8%	1.21
米国とうもろこし原料	26.8	3.4	36.6	4.8	0.3	0.0	71.9	2.5%	1.04
ブラジルさとうきび原料	5.9	1.3	0.3	8.0	0.3	0.0	15.9	78.4%	5.30
ガソリン	1.3	0.8	5.8	―	0.2	65.6	73.8	―	7.09

注1 ステージ項目の（　）内はガソリンのステージを表し，（－）はガソリンにはないステージである．
2 －は計算されない項目である．
3 バイオエタノールの燃焼に伴うGHG排出は，カーボンニュートラルによりゼロとカウントされる．

次に，海外で生産されたバイオエタノールを輸入した場合の GHG 排出量およびエネルギー収支をみると，まずアメリカにおけるとうもろこし原料のバイオエタノールを日本に輸入した場合には，GHG 排出量が 71.9 kg-CO_2/GJ-fuel，エネルギー収支が 1.04 となり，GHG 排出量はガソリンの 73.8 kg-CO_2/GJ-fuel とあまり変わらず，国内においてアメリカからとうもろこし原料のバイオエタノールを輸入した場合には地球温暖化防止の効果がほとんどないことが示された。また，エネルギー収支を見てもかろうじて 1 を上回る状況であることから，エネルギー生産としての機能もごくわずかであることが明らかとなった。したがって，日本においてバイオエタノールの導入により地球温暖化の防止を目指すのであれば，アメリカからの輸入バイオエタノールを使うことでは目的が達成されず，バイオエタノールの調達は国内生産もしくは実質的な GHG 削減効果のある他国もしくは他の原料のバイオエタノールの輸入が必要であることが示された。

一方，ブラジルにおけるさとうきび原料のバイオエタノールを輸入した場合を見てみる。三菱総合研究所（2003）によると，ブラジル産さとうきび原料のバイオエタノールは，GHG 排出量が 15.9kg-CO_2/GJ-fuel，エネルギー収支で 5.30 と，どちらも十勝地方で規格外小麦を原料として生産するバイオエタノールよりも良い結果となっている。ガソリンと比較した GHG 削減効果は 78.4%と，十勝地方の小麦原料の場合の 14.8%を大幅に上回っている。このように，ブラジル産バイオエタノールが十勝地方産バイオエタノールに対して地球温暖化防止面で大きな優位性を持つのは，ブラジルにおけるさとうきび原料のバイオエタノール生産では原料生産ステージおよびエタノール製造ステージにおける GHG 排出が少なかったためである。第 2 表からこれらの 2 ステージにおける GHG 排出量の合計をみると，十勝地方産バイオエタノールの 61.8kg-CO_2/GJ-fuel に対し，ブラジル産バイオエタノールはわずか 6.2kg-CO_2/GJ-fuel に過ぎず十勝の小麦原料の場合のおよそ 1/10 となっている。

このように両者の間で GHG 排出量に大きな差が出た要因としては，以下の 2 点が考えられる。第 1 に原料生産ステージにおいて十勝地方産バイオエタノールの原料である規格外小麦は，ブラジル産バイオエタノールの原料であるさとうきびよりもエネルギー集約的な生産が行われている点である。日本国内における規格外小麦は本来的に主産物である高品質の小麦を生産することを目的とした結果として副産物として生産されるものであるため，規格外小麦の生産にも高品質小麦と同程度に化学肥料や農薬，農業機械が投入されている。そのため，規格外小麦生産においても通常の高品質小麦と同程度の GHG が排出されることとなる。このようなことから，規格外小麦の原料利用は資源の有効活用として注目されているものの，LCA 分析においては環境負荷すなわち GHG の排出量を削減するには不利な条件となってしまうのである。

第 2 にブラジルにおけるバイオエタノール生産ではエタノール製造ステージにおいてさとうきびバガス（搾りかす）によるカーボンニュートラルなバイオマスエネルギーが利用

可能であるのに対し，十勝地方におけるバイオエタノール生産では製造時におけるすべての投入エネルギーを電力・重油などの外部からのエネルギー供給に依存せざるを得ない点である。この点については原料作物の性質によって製造時の投入エネルギーが大きく変わるという問題に起因しており，十勝地方におけるバイオエタノール生産が小麦を原料とする限り GHG 排出量の比較においてさとうきびを原料とするバイオエタノールにかなわないのはやむを得ないことである。この点に関しては，仮に原料がてんさいやとうもろこしの場合でも同様の問題が発生し，バイオエタノールの生産の地球温暖化防止効果ではさとうきび原料が圧倒的な比較優位を持つと言えよう。

しかしながら，以上の分析結果をもってわが国が消費されるバイオエタノールはすべてさとうきびを原料としたブラジルからの輸入で賄われるべきと結論づけるものではない。なぜならば，バイオ燃料の導入には GHG 削減効果のほかにも国内生産によって地域経済の活性化などの点において輸入バイオエタノールに比べて優位な点が存在するからである。また，国内生産においても GHG の削減が達成可能であるにもかかわらず，輸入に依存するのであれば，輸出国にバイオエタノール生産にかかる GHG 排出を負担させることになり，地球温暖化対策が世界的に取り組まれるべき重要課題という点からも望ましくないからである(14)。また，エネルギー自給の観点からはバイオ燃料を輸入に頼るのであれば，化石燃料からバイオ燃料に変換したところでエネルギー自給の確保には何ら効果はない(15)。このように，バイオ燃料の導入に関してはこれらの効果を総合的に踏まえた上で輸入か国産かの議論をする必要がある。

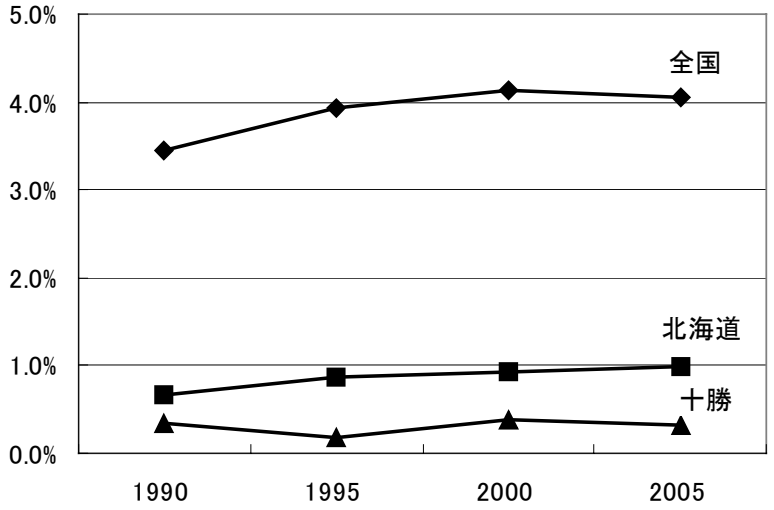
一方で，今後日本において国産バイオエタノールの導入を推進していくならば，将来的に輸入バイオエタノールに対する GHG 削減効果を向上させてゆく必要がある。本分析の結果から，十勝地方産規格外小麦原料のバイオエタノール生産では，原料生産ステージとエタノール製造ステージにおける GHG 排出量の削減が強く求められることが示唆された。原料生産ステージにおいては，有機農業など肥料や農薬投入量の削減に資する栽培技術や簡易耕起栽培または不耕起栽培のような農業機械投入の削減に資する栽培技術，そして農業機械への BDF の投入といった取組が GHG 排出量削減に有効と推察される。一方，エタノール製造ステージにおいては，地球温暖化対策面で効果のある家畜ふん尿を利用したバイオガスプラントをエタノール製造プラントに併設するといった手段が考えられ，併設されたバイオガスプラントから電力や熱エネルギーの供給を受けることでエタノール製造プラントの外部エネルギーへの依存を軽減することができると推察される(16)。次節以降，これら GHG 排出量を削減するのに有効と思われるいくつかの手法を用いた場合に，どのくらい GHG 排出量が削減できるかを検証する。

３．原料作物生産段階における温室効果ガス削減手法の検討

（１）耕作放棄地への原料小麦作付け

本節の課題は，国内の耕作放棄地に栽培した小麦を原料としたバイオエタノール生産を取り上げ，LCA 分析により GHG 削減効果の評価を試みることである。ここでも，前節の規格外小麦の事例と同様に北海道十勝地方を対象地域に取り上げ，耕作放棄地において生産される小麦を原料として，エタノール生産を行う想定事例を設定し LCA 分析を行う。

十勝地方は広大な平地を有することから，日本随一の穀倉地帯となっており，畑作を中心とした大陸的な大規模農業が行われている。このため，大規模農業の恩恵を十分に受け，衰退が危惧される日本農業の中でも，農業が大きな競争力を有する国内では数少ない地域と言える。このようなことから，十勝地方では耕作放棄される農地が他地域と比べても非常に少なく，十勝地方における耕作放棄地率は全国平均から比べてもきわめて低くなっている（第４図）。その意味においてはバイオエタノール原料用小麦の栽培には適していないとも言えよう。北海道バイオエタノール株式会社の計画においても，現在のところ耕作放棄地への原料小麦の作付けは検討されていない。



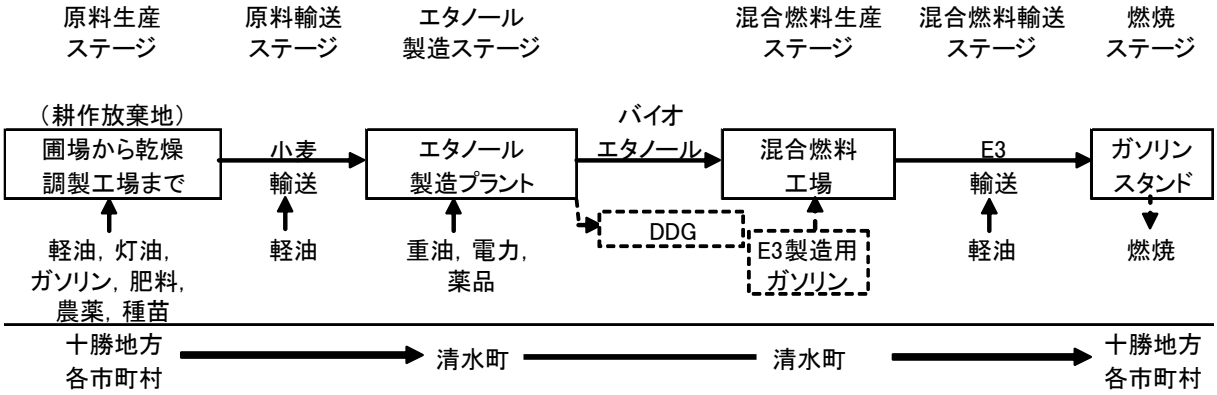
第４図　各地域における耕作放棄地の割合

出所：『世界農林業センサス』各年版．
注 割合は総農家における経営総面積に占める耕作放棄地面積の割合である．

当然ながらバイオエタノール原料用小麦の価格は食用小麦や他の農産物よりも低く抑えられることが予想されるため，農業者は現在農産物の作付けを行っている農地をあえて原料用小麦栽培に転換するインセンティブを持つことは想定しにくい(17)。また，環境面から考えても規格外小麦のような副産物を原料として利用するのではなく，はじめから栽培

した作物を原料とする場合には，LCA で見たバイオエタノール生産にかかる環境負荷も大きくなる。

それでもなお，なぜ本分析で耕作放棄地への原料作物作付けに着目しているのかというと，十勝地方でバイオエタノールを年間 1.5 万 KL 生産するには，規格外小麦だけでは不十分であるためである。前述のとおり，北海道バイオエタノール株式会社の事業計画では規格外小麦のほかにてんさいもバイオエタノールの原料として検討している。しかしながら，複数の原料に依存することは生産工程の複雑化，設備投資の増大，品質の確保など様々な問題が生じるため(18)，原料は 1 種類にすることが効率的と言える。そのためには，規格外小麦以外にいかに原料小麦を確保するかを検討しなければならない。その 1 つの方策として，耕作放棄地への小麦栽培が考えられるのである(19)。



第5図　十勝耕作放棄地栽培小麦原料バイオエタノール生産のモデルフロー

出所：十勝圏振興機構(2005)，北海道農業協同組合中央会ヒアリング調査（2006年12月）.
注　[ ] は環境負荷の計測から除外した項目である.

（２）分析モデル

耕作放棄地作付けモデルのフローは第５図に示されるが，このモデルフローは基本的に第２図と同様で，十勝支庁 20 市町村の耕作放棄地で栽培した小麦をすべて清水町のバイオエタノールプラントに搬送してバイオエタノールを製造し，E3 に加工して十勝地方 20 市町村において販売するものである。前節の規格外小麦のモデルフロートの違いは，小麦の作付けが耕作放棄地で行われる点と販売地が十勝地方のみに限定され，札幌への販売がない点のみである。札幌における販売を導入しない理由は，耕作放棄地への作付けで収穫される小麦の量が規格外小麦の発生量よりも少なく，そこから生産される E3 の量は十勝地方ですべて消費することができる量であるためである。すなわち，本モデルでは十勝地方で原料生産から消費までのすべてが行われるいわゆるバイオエタノールの「地産地消モデル」となっている。

ところで，前節の規格外小麦モデルではバイオエタノールの生産量が多いため，ガソリ

ンとの混合施設を清水町のバイオエタノールプラントに併設するというシナリオ設定としていた。耕作放棄地モデルでも，規格外小麦モデルとの比較可能性を確保すること，本分析ではバイオエタノールを地域内で自給自足させたモデルの構築を目指していることの２つの理由から，前節と同じく清水町内に燃料混合プラントを建設するというシナリオを採用した。

もう１つ，前節の規格外小麦モデルとの違いは，耕作放棄地における慣行栽培のほか，耕作放棄地で簡易耕起栽培を行った場合と，ふん尿スラリーを投入し化学肥料を削減した場合の２つのケースについても GHG 削減効果を計測する点にある。原料小麦の作付けには極力資材・労働力投入を削減し，コストと環境負荷を抑制することが求められる。また，十勝地方は畑作地帯であるとともに酪農経営も盛んで，小麦の栽培が行われる地域周辺でのふん尿スラリーの確保は比較的容易である。このようなことから，簡易耕起栽培による農業機械使用の削減および化学肥料の削減を目的としたふん尿スラリーの投入はそれほど非現実的なシナリオではない。よって，本分析では耕作放棄地での原料小麦作付けをベースとして，慣行栽培ケースと簡易耕起栽培のケース，ふん尿スラリー投入ケースの３つのシナリオを設定し GHG 削減効果を計測する。これら３つのシナリオに従って，第３表，第４表および第５表のとおり耕作放棄地栽培小麦原料のバイオエタノール生産に伴う投入要素および産出要素を特定してその量もしくは金額を算出し GHG 量を計測した。なお，機能単位およびエネルギー，環境負荷の配分方法，計測対象の GHG などは，規格外小麦モデルと同様の取扱いとする。

第3表　耕作放棄地栽培（慣行栽培）小麦原料バイオエタノール生産に伴う投入要素および産出要素

ステージ		項目	投入量・額	算出用データ出所
投入	原料生産	軽油	152 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		灯油	139 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		ガソリン	4 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		電力	106,539 kWh	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		肥料	93 百万円	北海道農政部(2005)
		種苗	28 百万円	北海道農政部(2005)
		農薬	33 百万円	北海道農政部(2005)
		肥料窒素	111 tN	北海道農政部(2004)
	原料輸送	軽油	18 KL	三菱総合研究所(2003), ナビタイムジャパン(online)
	BE製造	電力	1,099,558 kWh	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
		重油	476 KL	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
		薬品	16 百万円	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
	E3輸送	軽油	3 KL	三菱総合研究所(2003), ナビタイムジャパン(online)
産出	原料生産	小麦	6,140 t-原物	農林水産省北海道統計・情報事務所(2006), 十勝圏振興機構(2005)
		麦稈窒素	29 tN	北海道農政部(2005), 農林水産技術情報協会(1996,1997), 松本他(1990), 尾和(1996)
	BE製造	バイオエタノール	2,628 KL	十勝圏振興機構(2005)
		DDGS	1,842 t-原物	十勝圏振興機構(2005)
	E3製造	E3	87,601 KL	エタノール混合比率(3%)より計算

注 投入量・額は副産物との間で環境負荷を配分した後の値である.

まず，第３表の慣行栽培シナリオについて前提条件を整理すると，耕作放棄地への作付

けで生産される小麦の量は 6,140t にとどまり，規格外小麦の場合のおよそ 1/4 に留まる。これは，前述のとおり十勝地方では耕作放棄地の面積が少なく，小麦の作付面積が確保できないためである。耕作放棄地への作付けした小麦から生産されるバイオエタノールの量は 2,628KL にとどまり，E3 量にすると 87,601KL となる。

次に，簡易耕起栽培シナリオの前提条件であるが（第４表），以下の３点について慣行栽培との違いを検討した。第１に播種前のプラウによる耕起を省略し，砕土整地作業をロータリーハローでの１回に削減し，さらに麦桿のすき込みもプラウからチゼルプラウに変更するという前提とした。これにより，原料生産段階における軽油消費量を慣行栽培に比べて 18%削減できる。第２に簡易耕起栽培では慣行栽培時よりも雑草管理が重要であり，継続的な簡易耕起栽培のためには収穫後の除草剤散布が不可欠となる。そのため，簡易耕起栽培シナリオでは収穫後非選択性除草剤の散布を追加的に１回行うこととした。この結果，簡易耕起栽培では慣行栽培に比べ農薬使用費が 37.5%増加した。第３に収量の変化である。小川他（1998）や古賀（2004）では簡易耕起栽培を行った場合の収量は慣行栽培に比べても変わらないとの結果を導いており，本分析でも簡易耕起栽培時の収量は慣行栽培と変わらないとして分析を行った。

第4表　耕作放棄地栽培（簡易耕起）小麦原料バイオエタノール生産に伴う投入要素および産出要素

	ステージ	項目	投入量・額	算出用データ出所
投入	原料生産	軽油	124 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		灯油	139 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		ガソリン	4 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		電力	106,539 kWh	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		肥料	93 百万円	北海道農政部(2005)
		種苗	28 百万円	北海道農政部(2005)
		農薬	45 百万円	北海道農政部(2005)
		肥料窒素	111 tN	北海道農政部(2004)
	原料輸送	軽油	18 KL	三菱総合研究所(2003), ナビタイムジャパン(online)
	BE製造	電力	1,099,558 kWh	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
		重油	476 KL	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
		薬品	16 百万円	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
	E3輸送	軽油	3 KL	三菱総合研究所(2003), ナビタイムジャパン(online)
産出	原料生産	規格外小麦	6,140 t-原物	農林水産省北海道統計・情報事務所(2006), 十勝圏振興機構(2005)
		麦稈窒素	29 tN	北海道農政部(2005), 農林水産技術情報協会(1996,1997), 松本他(1990), 尾和(1996)
	BE製造	バイオエタノール	2,628 KL	十勝圏振興機構(2005)
		DDG	1,842 t-原物	十勝圏振興機構(2005)
	E3製造	E3	87,601 KL	エタノール混合比率(3%)より計算

注 投入量・額は副産物との間で環境負荷を配分した後の値である.

一方，ふん尿スラリー投入シナリオの前提条件については，以下の３点で慣行栽培シナリオとの相違点を検討した（第５表）。第１にふん尿スラリー投入に伴う燃料消費の増加である。これは，ふん尿スラリーを散布する追加的作業による機械運転に伴い軽油の消費量が増大するためである[20]。既存のデータから推計した結果，慣行栽培に比べた軽油消費量の増加率は 6.8%となった。第２にふん尿スラリーの投入に伴う化学肥料の削減である。こ

こでは化学窒素肥料を代替する形でふん尿スラリーが投入されため，耕作放棄地に投入される窒素量の合計は慣行栽培シナリオと変わらない。また，カリウム肥料についてもふん尿スラリーの成分に含まれるカリウムが化学肥料の一部を代替すると仮定しているが，リン肥料については，ふん尿スラリー成分にリンが含まれていないため，化学肥料を慣行栽培と同じ量投入すると仮定する。計算ではふん尿スラリー投入により窒素肥料の投入が窒素換算で 23%削減される結果となった。第３に，ふん尿スラリー投入による小麦単収の増加についてである。北海道立十勝農業試験場（1999）における圃場実験により，小麦栽培にふん尿スラリーを投入することで単収は平均 8.3%増加することが示されている。しかしながら，ふん尿スラリー投入と単収の関係は統計的に有意ではないため，本分析においては収穫不変と仮定して計算する。

第5表　耕作放棄地栽培（スラリー投入）小麦原料バイオエタノール生産に伴う投入要素および産出要素

ステージ		項目	投入量・額	算出用データ出所
投入	原料生産	軽油	162 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		灯油	139 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		ガソリン	4 KL	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		電力	106,539 kWh	農林水産技術情報協会(1996,1997)
		肥料	56 百万円	北海道農政部(2005)
		種苗	28 百万円	北海道農政部(2005)
		農薬	33 百万円	北海道農政部(2005)
		肥料窒素	123 tN	北海道農政部(2004)
		うち化学肥料	97 tN	北海道農政部(2004), 北海道立十勝農業試験場(1999)
		うちスラリー	26 tN	北海道立農業畜産試験場(2004)
		スラリー炭素	1,193 tC	農林水産省北海道統計・情報事務所(2007)
	原料輸送	軽油	19 KL	三菱総合研究所(2003), ナビタイムジャパン(online)
	BE製造	電力	1,099,558 kWh	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
		重油	476 KL	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
		薬品	16 百万円	新エネルギー産業総合開発機構(2003)
	E3輸送	軽油	3 KL	三菱総合研究所(2003), ナビタイムジャパン(online)
産出	原料生産	規格外小麦	6,647 t-原物	農林水産省北海道統計・情報事務所(2006), 十勝圏振興機構(2005)
		麦稈窒素	29 tN	北海道農政部(2005), 農林水産技術情報協会(1996,1997), 松本他(1990), 尾和(1996)
	BE製造	バイオエタノール	2,628 KL	十勝圏振興機構(2005)
		DDG	1,842 t-原物	十勝圏振興機構(2005)
	E3製造	E3	87,601 KL	エタノール混合比率(3%)より計算

注 投入量・額は副産物との間で環境負荷を配分した後の値である.

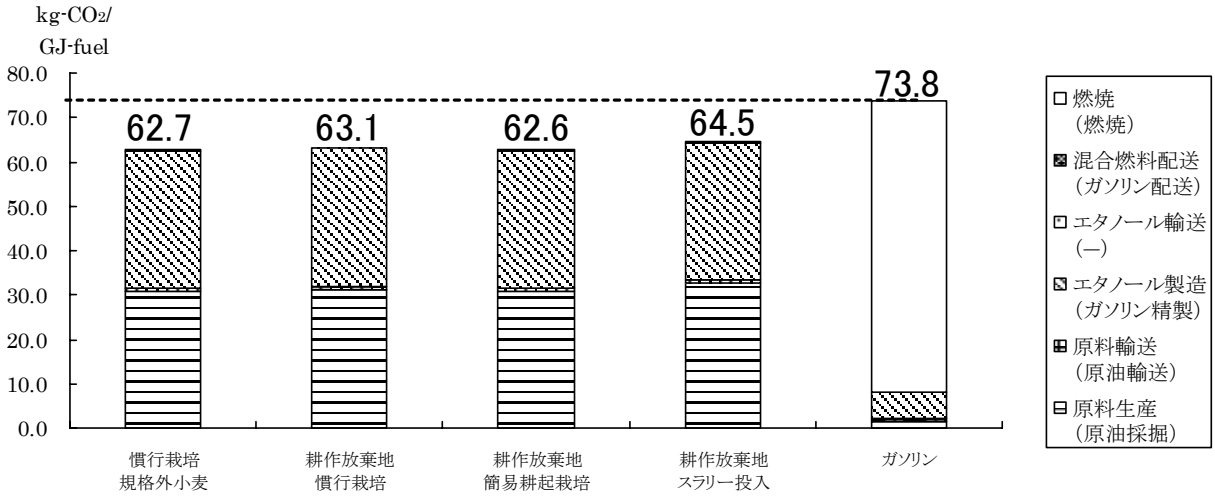
（３）分析結果及び考察

計測結果については第６図および第６表に掲げた。耕作放棄地で慣行栽培された小麦を原料とするバイオエタノールの生産に伴う GHG 排出量は，63.1kg-CO_2/GJ-fuel となり，規格外小麦の場合から若干増加する結果となった。また，エネルギー収支は 1.21 と規格外小麦の場合と同じで，エネルギー生産としての役割を果たしていることが示された。この結果からは，耕作放棄地における栽培においても規格外小麦とほぼ同等の GHG 削減効果が得られることが示された。

この要因としては耕作放棄地における原料小麦生産において慣行栽培を想定しているた

め，投入されるエネルギー量，投入資材量が通常の農地に作付けする場合と同じと仮定しているためである。また，GHG 排出量が規格外小麦の場合よりも増加している要因は，耕作放棄地は単収の低い地域で多く，単収の高い地域で少ないため，必然的に投入資材あたりの収穫量は規格外小麦の場合よりも少なくなってしまうためである。

次に耕作放棄地における原料小麦栽培に簡易耕起を導入した場合の結果を見る（第６図，第６表）。これを見ると，簡易耕起栽培の場合の GHG 排出量は 62.6kg-CO_2-eq /GJ-fuel で，慣行栽培の場合から若干低下するものの大きな GHG 削減となっておらず，規格外小麦の場合とほぼ同じ水準になることがわかる。GHG 削減量が耕作放棄地への慣行栽培から大きく低下していないのは，簡易耕起の際に必要となる追加的除草剤散布に伴う GHG 排出増加が影響し，簡易耕起栽培による燃料消費量削減による GHG 排出削減を相殺しているためと考えられる。このようなことから，簡易耕起栽培による農業機械使用に由来する GHG の削減と追加的散布による有効な GHG 削減手段とはなりにくいことが示された。



第６図　耕作放棄地栽培小麦原料バイオエタノール生産の GHG 排出量の計測結果

注 ガソリンの事例は船崎・種田(1999)から引用した.

第6表 耕作放棄地栽培小麦のステージ別GHG排出量とエネルギー収支

（kg-CO_2/GJ-fuel）

産地および原料	原料生産（原油採掘）	原料輸送（原油輸送）	燃料製造（精製）	混合燃料配送（ガソリン配送）	燃焼（燃焼）	合計	ガソリンからの削減率	エネルギー収支
規格外小麦	30.8	0.6	30.9	0.4	0.0	62.7	15.0%	1.21
耕作放棄地慣行栽培	31.3	0.8	30.9	0.1	0.0	63.1	14.4%	1.21
耕作放棄地簡易耕起栽培	30.8	0.8	30.9	0.1	0.0	62.6	15.2%	1.22
耕作放棄地スラリー投入	32.7	0.7	30.9	0.1	0.0	64.5	12.5%	1.27
ガソリン	1.3	0.8	5.8	0.2	65.6	73.8	−	7.09

注1 ステージ項目の（ ）内はガソリンのステージを表す.
2 バイオエタノールの燃焼に伴うGHG排出は，カーボンニュートラルによりゼロとカウントしている.

ただし，上記の結果は高品質小麦を生産することを目的とした小麦栽培に簡易耕起栽培を導入した既存捕縄実験データを基礎データとして使用しており，高品質よりもむしろ高バイオマス量が求められるバイオエタノールの原料用小麦に適用することが妥当かどうかの議論が残されている。バイオエタノールの原料小麦生産は高品質の小麦の生産を目的とするものではないため粗放的な栽培が求められる。しかしながら，本分析ではそのような粗放的な栽培を意図したシナリオにはしていないため，通常の農地における栽培と同程度の GHG が発生するという結果となったと思われる。したがって，これら結果は耕作放棄地での原料小麦生産におけるかなり過大評価としていると考えられる。耕作放棄地における原料小麦栽培においては今後どのように投入エネルギーおよび投入資材を削減してゆくかがさらなる GHG 削減効果の向上の鍵となる。この点についてはこの後第 5 節で議論する。

一方，耕作放棄地における小麦栽培にふん尿スラリーを投入した場合の GHG 削減効果を見ると，GHG 排出量は 64.5kg-CO_2-eq/GJ-fuel となり，GHG 削減率もガソリンの場合と比べて 12.5%にとどまることが示された。この結果は規格外小麦のケースから比べても GHG 排出量が逆に 2.2%増加し，ふん尿スラリーを投入することでは GHG 削減効果を向上できないことを示すものである。一方，エネルギー収支については 1.27 に達し，規格外小麦のケースからも向上する結果となった。以上の結果から，耕作放棄地における原料小麦は，エネルギー収支の向上には貢献するものの，ふん尿スラリーを直接農地に投入して栽培することでは GHG 削減効果を得ることができず，むしろ GHG 削減効果を減退させてしまうことが明らかとなった。

このような結果がもたらされた背景には，ふん尿スラリーに含まれる窒素成分のうち，化学肥料の代替要素として有効に利用されるものは一部にとどまり，残りの窒素成分は土壌中の窒素分を増加させ，結果として原料小麦生産における N_2O 排出量が増加したことがある。また，エネルギー収支が向上したのは，ふん尿スラリーの投入によって投入される化学肥料も減少し，化学肥料の製造に伴うエネルギー投入が削減されたためと考えられる。ふん尿スラリーは酪農経営の副産物として発生するものであるため，その適正な利用は酪農経営にとってもメリットがある。特に十勝地方のような畑酪混合農業地帯では農地へのふん尿スラリー還元がもっとも効率的な資源循環方法の 1 つと考えられる。しかしながら，今回の分析結果からは農地にふん尿スラリーを直接的に投入すれば，GHG 削減効果はむしろ減退してしまうことが示された。このことは，GHG 削減効果を目指してスラリーを利用する場合には，農地への投入以外の適切な方法を検討する必要があることを示唆するものである。

４．燃料製造段階における温室効果ガス削減手法の検討

（１）分析の目的

前節において，バイオエタノール生産に際し原料小麦の栽培にふん尿スラリーを直接投入することでは GHG 削減効果が得られないことを明らかにした。しかしながら，前述のとおり畑酪混合農業地帯である十勝地方において家畜ふん尿はもっとも有効なバイオマス資源であり，これを有効に活用することが地域内の資源循環を促進する鍵になると言っても過言ではない。

そこで本節では，ふん尿スラリーを農地投入以外にどのように利用すれば，GHG 削減効果を向上させることができるかを検討する。具体的には，バイオガスプラント（以下，BGP）にふん尿スラリーを投入し電力と熱を発生させ，これらをバイオ燃料製造に投入することで GHG 削減効果がどのくらい向上するかを分析する。

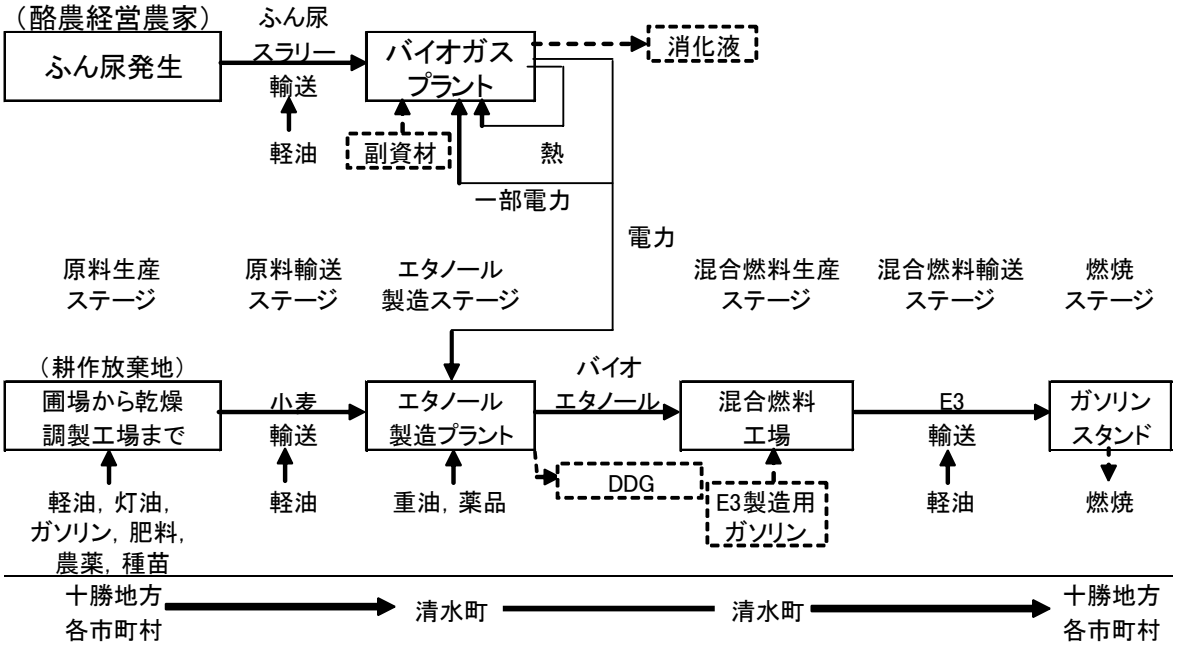
（２）分析シナリオ

まず，分析シナリオについては，前節と同様，耕作放棄地においてバイオエタノール原料用の小麦を慣行栽培し，バイオエタノール製造段階において，バイオエタノールプラントに併設された BGP に周辺酪農経営農家で発生するふん尿スラリーを搬入して電力を発生させ，これをバイオエタノールプラントに供給するという設定とする。LCA 分析のシステム境界は，第７図のように設定される。酪農経営農家については，ふん尿発生をシステム境界とし，家畜飼養に関わる環境負荷は除外している。また，BGP でエネルギー発生後に生じる消化液は BGP へふん尿スラリーを供給している農家の圃場に還元し，小麦を作付けする耕作放棄地には還元しないこととする。その理由として，BGP から十勝地方に分散する耕作放棄地への輸送では消化液の輸送距離が長くなり現実的ではないこと，ふん尿スラリー供給農家は BGP 事業者にふん尿スラリーを提供する代わりに消化液を引き取るので，BGP 事業者は消化液を販売している訳ではないという２点からである。最後に，北海道土木開発研究所（2005）によると，BGP にはふん尿スラリーのほか，副資材として有機質資源を投入することで発電・発熱効率が向上する。そのため，本分析においても副資材を投入することを前提とした。ただし，副資材はあくまで BGP 事業者が処理代金を得て処理するものであるため,副資材の輸送･搬入にかかる環境負荷は計算から除外する。

次に細かな設定について解説する。BGP の主要諸元については，北海道土木開発研究所（2005）における設定を参考に，乳牛および肉牛 1000 頭規模[21]，ふん尿の受け入れ形状はスラリー10 割，バイオガス発生量をふん尿 1m^3 あたり 30m^3 とした。副資材としては，廃用牛乳，廃脱脂粉乳，廃用バターなどである。十勝地方には乳製品メーカーの工場も点在しており，これらはいずれも十勝地方でも一定量発生する有機性廃棄物と考えられる。このようなふん尿および副資材の投入によって，BGP からバイオエタノールプラントへ供

給される電力量は年間 63 万 2,851kWh で，BGP からの電力供給により，耕作放棄地に作付けした小麦を原料とするバイオエタノール生産に必要な電力量の約 51%を賄うことができる。一方，発生した熱については全て BGP での発酵槽保温などに用いられ，バイオエタノールプラントへの供給はないものとする。

BGP 導入による新たな化石燃料消費項目としては，酪農経営農家から BGP までのふん尿の輸送にかかる軽油消費および BGP 内での搬入機械稼働で必要となる軽油消費があり，BGP 導入による追加的軽油消費量は年間 17.7KL と算出された。第 7 図に示したシステム境界設定ではこの軽油消費量の増加分以外に追加的なエネルギー及び資材の投入はないこととなる。



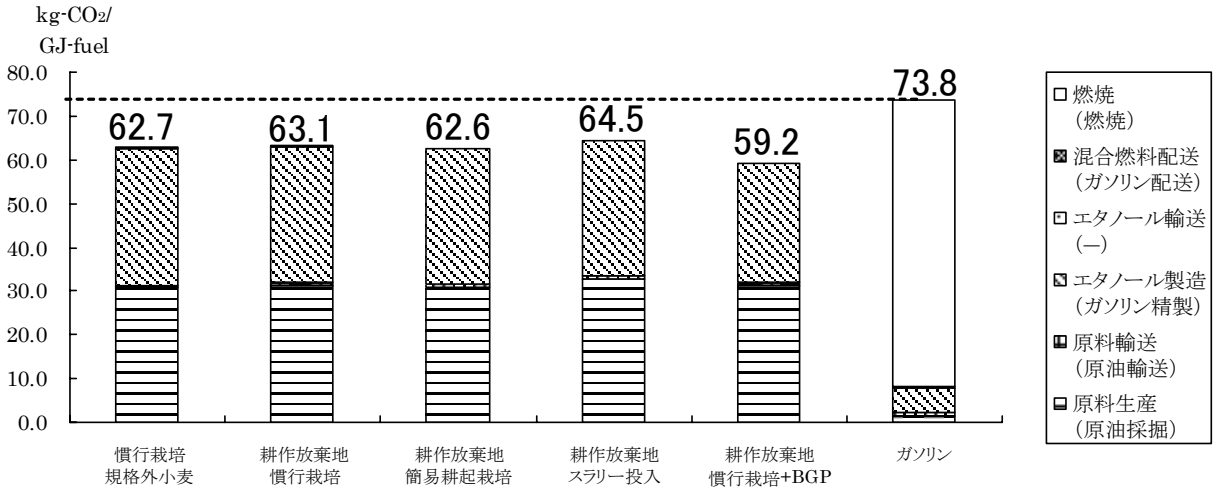
第7図 BGPエネルギー供給バイオエタノール生産のモデルフロー

出所：十勝圏振興機構(2005)，北海道農業協同組合中央会ヒアリング調査（2006年12月），北海道土木開発研究所（2005）.

注 ⬚ は環境負荷の計測から除外した項目である.

（３）分析結果

分析結果は第 8 図および第 7 表に示した。これを見ると，耕作放棄地で生産される小麦を原料とし，さらに BGP からバイオエタノールプラントへ電力供給を行うことで，GHG 排出量は 59.2kg-CO_2/GJ-fuel となり，電力供給がない場合に比べ GHG 削減率が 5.4 ポイント向上した。エネルギー収支についても 1.27 に向上している。このようなことから，ふん尿スラリーを利用した BGP からの電力供給はバイオエタノール生産における GHG 削減効果の向上に貢献することが示された。



第８図　耕作放棄地栽培小麦原料バイオエタノール生産の GHG 排出量の計測結果

注 ガソリンの事例は船崎・種田(1999)から引用した.

第7表　バイオガスプラント導入時のGHG排出量とエネルギー収支

(kg-CO_2/GJ-fuel)

産地および原料	原料生産（原油採掘）	原料輸送（原油輸送）	燃料製造（精製）	E3配送（ｶﾞｿﾘﾝ配送）	燃焼（燃焼）	合計	ガソリンからの削減率	エネルギー収支
耕作放棄地慣行栽培	31.3	0.8	30.9	0.1	0.0	63.1	14.4%	1.21
耕作放棄地慣行栽培+BGP	31.3	0.8	27.0	0.1	0.0	59.2	19.8%	1.27
ガソリン	1.3	0.8	5.8	0.2	65.6	73.8	−	7.09

注1 ステージ項目の（　）内はガソリンのステージを表す.
　2 バイオエタノールの燃焼に伴うGHG排出は，カーボンニュートラルによりゼロとカウントしている.

このような結果は，これまで廃棄物として処理されていたふん尿スラリーが GHG 削減のための有効な資源であることを示すものである。特に分析対象の十勝地方では畑酪混合農業が営まれ，ふん尿スラリーが十分確保できるという特性を持ち，さらには大規模な酪農経営が行われているため，家畜ふん尿による周辺環境汚染の問題も過去に生じたことがある。GHG 削減とふん尿による環境汚染問題を同時に解決する方法としても，BGP へのふん尿スラリー投入は有効な手段と言える。さらに，BGP から副産物として発生する消化液は，農地に還元することで作物の収量を増加させることができ，農家にとっても魅力的な有機肥料である[22]。このように，BGP によるエネルギー供給は廃棄物としての家畜ふん尿処理，クリーンエネルギーの供給による地球温暖化防止，副産物投入による作物単収増加という「一石三鳥」の効果が得られるのである。

さらに，前節までの分析結果を踏まえると，ふん尿スラリーは農地へ直接投入するよりも BGP へ投入し，BGP で発生した消化液を農地へ投入するという資源循環システムを構築

することで，環境負荷の削減と農産物収量の増加を両立させることができることが示された。また，このような資源循環システムの中にバイオエタノール生産を組み込むことで，バイオエタノールの生産・消費を含めた高度な資源循環システムと地球温暖化防止策を構築することができる。

５．分析の限界と課題

（１）シナリオ設定の限界

以上，本章ではバイオエタノールを対象として，GHG 削減効果を LCA 分析により評価してきた。しかしながら，先に紹介した LCA 分析結果にも限界と課題が残されている。LCA 分析の手法としての限界についてはすでに第 1 章で論じているので，本節では本章のバイオエタノール生産における LCA 分析の限界と課題について主に本分析に特有の限界および課題を整理する。

まず，本分析で採用したシナリオ設定は，十勝地方において最も GHG 排出量を少なくするシステムを想定して分析を行い，GHG 削減効果の最大値を計測することを分析の目的としたものである。したがって，今後展開される十勝地方におけるバイオエタノール生産とは異なる点がある。これまでに明らかになった実際の計画との相違点としては，現実の計画では十勝地方で生産されたエタノールは横浜市へ海上輸送し，そこで ETBE へ転換された後に全国各地で販売されることになっている点を挙げることができる。本分析では，E3 として販売される点や十勝地方や北海道内のみに販売地域が限定されるという点で実際の動きと異なる。このような相違は，本分析では十勝地方においてバイオエタノールを生産する場合に GHG 削減効果を最大限に高めるような生産・流通・販売方式を採用した場合にはどれだけの GHG 削減効果になるかを把握することを目的としており，実際の計画をフォローした分析を想定していないことが大きい。また，分析に関するデータを収集した 2006 年末から 2007 年前半の時点では，まだ十勝地方におけるバイオエタノール生産の計画の全容が明らかにされておらず，想定や仮定を置いたもとで分析を進めざるを得なかったこともう 1 つの要因として挙げることができる。

ただし，このような現実との乖離は決して本分析の結果を否定するものではない。前述のとおり，本分析は十勝地方でバイオエタノール生産を行い，GHG 排出量を最小化した場合にはどのようなシステムが考えられるのか，またその際の GHG 排出量はガソリンと比べどの程度削減されるのかを計測するものである。当然ながら，実際のバイオエタノールの生産には GHG 排出量の最小化だけではなく，経済性など諸々の要因を考慮した上で生産計画・販売計画が策定される。このようなことから，GHG 排出量の最小化のみを考慮した本分析のシナリオと実際の計画が異なることは半ば当然とも言える。

以上のように，本章における LCA 分析は十勝地方でバイオエタノール生産が行われた

場合の GHG 削減効果の仮想的な最大値を示すものであり，実際に十勝地方でバイオエタノール生産が行われた場合の GHG 排出量を計測するものではないことに留意されたい。

（２）施設建設等に関わる環境負荷量

本章の分析ではバイオエタノール製造プラントやバイオガスプラントなど施設の建設に伴う環境負荷は計測していない。また，耕作放棄地において原料小麦の栽培を行う際も耕作放棄地を農地として再生するために必要な農業機械稼働などから発生する環境負荷は考慮していない。分析はあくまで「フロー部分」の環境負荷を捉えるもので，施設や農地といった「ストック部分」からの環境負荷は計測の対象とはしていない点に限界がある。もちろん，これらの環境負荷も計測に取り入れることは可能だが，本章の分析の目的はバイオエタノールを生産する工程から発生する GHG を計測することであるため，ストック部分にかかる環境負荷は計測対象から除外している。もちろん，比較対象となるブラジルやアメリカ，ガソリンなど本分析と比較した事例においてもストック部分にかかる GHG は除かれている。

（３）原料作物栽培技術

原料作物のバイオマス量が多ければ多いほどバイオ燃料の収量も多くなることから，バイオ燃料の大量生産にはより多くの原料の供給が必要となるが，これに加え，原料作物は低コストで供給する必要がある。このことは，これまで日本においては主に「高品質，高付加価値」を目指して農業生産が行われてきたことと正反対の動きで，原料作物の生産には日本の農業の前提を根本から覆すような大きな転換が求められる。このように，バイオ燃料の原料作物生産はこれまで農業者が取り組んでこなかった「手間と費用をかけず，低品質でも高バイオマス」な農産物生産を新たに行うことにもなる。

このことは，本章で紹介したバイオエタノールの LCA 分析とも深く関連する。すなわち，LCA 分析に用いた基礎データは「手間と費用をかけず，低品質でも高バイオマス」といったことを目的とした農業生産方式から得られたものではなく，「高品質，高付加価値」を目指した農業生産方式のデータである。両者の目的が大きく異なることから，用いたデータが果たしてバイオエタノールの原料生産に本当に妥当なデータなのかは現段階では明らかではない。

具体的に例を挙げると，本章の分析では例えば耕作放棄地において原料小麦を栽培するシナリオの分析においても「高品質，高付加価値」を目指した通常の小麦栽培のデータを適用して計算している。バイオエタノールの原料作物としての小麦には，高品質な小麦より高バイオマス量の小麦が求められる上，究極の粗放栽培でコストを抑制することが求められる。結果として，本章における分析で得られた GHG 排出量の計測結果は過大評価になっているかもしれない。しかしながら，本分析を行った段階では日本におけるバイオエ

タノール生産がまだ本格的に始まっていない段階であり，バイオエタノール用の原料作物栽培によって排出される GHG 量もこれまでの既存研究のデータを用いざるを得ない状況である。本章における分析結果を解釈する際には，この点も限界点として踏まえる必要がある。

６．おわりに

本章では北海道十勝地方の規格外小麦を原料とするバイオエタノール生産を事例に，バイオエタノール生産に伴う GHG 削減効果を，LCA 分析を用いて定量的に評価することを目的としてきた。十勝地方における規格外小麦を原料とするバイオエタノール生産では，ガソリンに比べ GHG を削減できることが示された。一方で，一連のバイオエタノール生産のライフサイクルにおいて発生する GHG は，原料作物生産段階と燃料製造段階でほとんどを占めることも明らかになり，今後わが国において国産バイオエタノール導入を推進していくならば，原料作物生産時およびバイオエタノール製造時における GHG 排出抑制が GHG 削減効果の向上に大きな影響をもたらすことが明らかとなった。

このような結果から，耕作放棄地への作付けをベースとして，各種環境負荷削減技術を導入した場合，十勝地方におけるバイオエタノール生産システムでどれだけ GHG が削減できるかを検証した。その結果，耕作放棄地に簡易耕起栽培をした場合には規格外小麦と同様の水準の GHG 排出量となり，ふん尿スラリーを投入した栽培では GHG 排出量は規格外小麦の場合よりも増加してしまうことが明らかとなった。一方で，バイオエタノールプラントに BGP を併設し，ふん尿スラリーを投入したエネルギー供給を行った場合，GHG 削減効果の向上に貢献することが示された。この結果はふん尿を資源として有効利用した資源循環システムを構築する際にも，ふん尿の活用方法を誤ると GHG 削減効果が得られない可能性を示唆するものである。したがって，ふん尿の有効利用と地球温暖化防止を両立するようなシステム構築が求められ，その一例としてふん尿スラリーを農地へ直接投入せず BGP へ投入し，BGP で発生した消化液を農地へ投入するという資源循環システムを構築することであることが示された。

ただし，本章における分析は費用や採算性といったバイオエタノール生産の経営的側面や地域に与える経済効果などの経済的側面を考慮したものではなく，あくまで GHG 排出を最小化する生産システムを見いだすことを主眼に置いたものである。また，GHG 以外の各種環境負荷についても本章の分析では取り上げていない。これらの点は本分析の限界点として挙げられるが，次章ではバイオエタノール生産が地域経済に与える影響を分析し，本章で取り扱わなかった部分のうち地域経済効果の定量化を試みる。

補論１　アメリカとうもろこし原料バイオエタノール LCA 結果の修正

（１）はじめに

ここでは，国内小麦原料バイオエタノールとアメリカとうもろこし原料バイオエタノールの輸入におけるエネルギー収支および GHG 排出量の比較を行うため，アメリカとうもろこし原料のバイオエタノールの LCA 分析を行った Pimentel and Patzek(2005)の分析結果の修正方法を解説する。

Pimentel and Patzek(2005)では，アメリカにおけるとうもろこし原料のバイオエタノール生産について，原料作物（とうもろこし）生産およびそれを原料とするバイオエタノール生産の LCA 分析が行われている。この論文では原料となるとうもろこしの生産およびバイオエタノールの生産にかかるエネルギー投入量からバイオ燃料生産のエネルギー収支が計算されており，その結果バイオエタノールの生産に投入されるエネルギーは産出エネルギーより 29%も多く，エネルギー収支はマイナスであるとの結論を導いている。とうもろこし原料のほか，スイッチグラス，木質を原料とするバイオエタノール，大豆とひまわりを原料とする BDF についてもエネルギー収支が計算されており，いずれもエネルギー収支がマイナスという結果となっている。

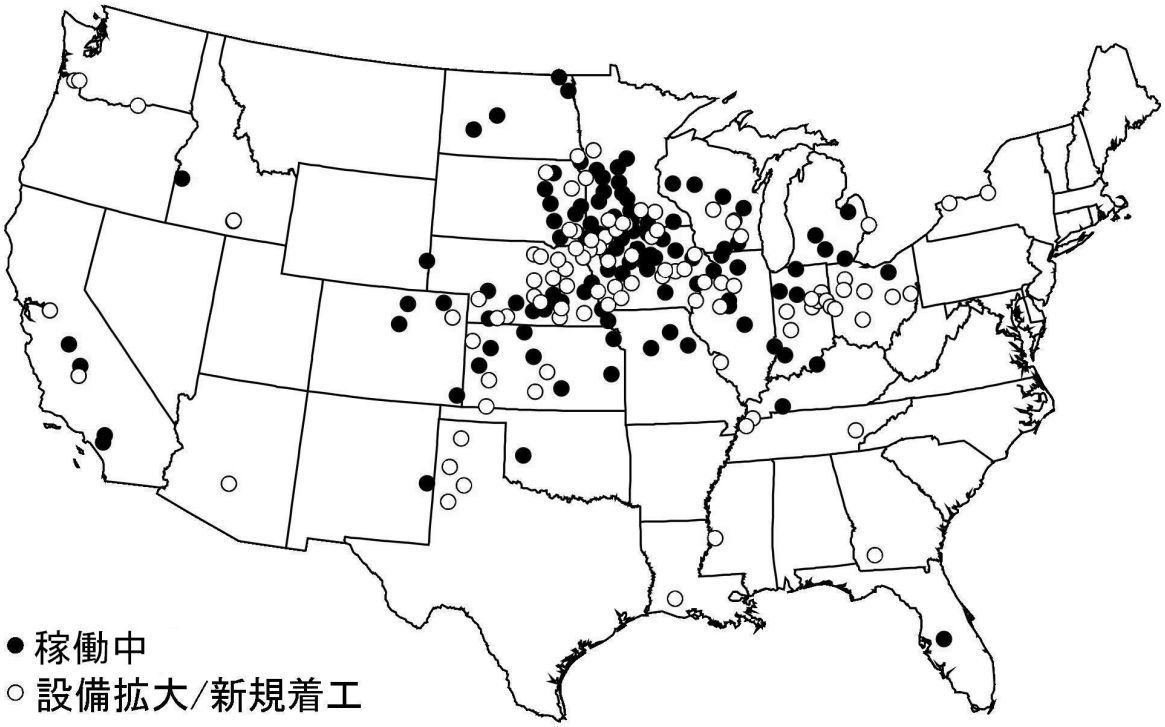
本章の分析結果と Pimentel and Patzek(2005)の分析結果では前提とする条件が異なるため，単純に両者を比較することはできない。そこで，Pimentel and Patzek(2005)における生産条件によりアメリカでとうもろこしを原料に生産されたバイオ燃料 1000KL を日本へ輸入する場合のエネルギー収支およびバイオ燃料熱量単位あたり GHG 排出量を計算し，本章の分析結果と比較することとする。

具体的には, Pimentel and Patzek(2005)の結果を本章での分析結果と比較できるよう，大きく以下の３点の修正を行った。第１に Pimentel and Patzek(2005)では日本までの輸送にかかるエネルギーが考慮されていないためこれを計算に含めること，第２にエネルギー収支だけでなく GHG 排出量を計算すること，第３に Pimentel and Patzek(2005)のシステム境界を本稿の分析に合わせ Pimentel and Patzek(2005)に含まれるいくつかの項目を分析から除くことである。

（２）日本までの輸送の考慮

Pimentel and Patzek(2005)では特に米国内のどの地域でバイオ燃料の生産が行われるかは特定されていないが，第９図に示すとおり，バイオエタノールの生産プラントは原料となるとうもろこしの生産が盛んなアメリカ中西部コーンベルト地帯に集中しており，本分析においてもアメリカ中部のコーンベルト地帯で生産が行われると仮定するのが妥当と判断される。アメリカ中部から日本までの輸送については，まずは内陸部から西海岸まで鉄道で輸送し[23]，そこから船舶で日本まで輸送すると想定する。具体的には，アメリカ中

部から西海岸のサンフランシスコまで鉄道輸送とし，さらにサンフランシスコから京浜港（横浜市）まで海上輸送すると仮定した。アメリカ中部からサンフランシスコまでの鉄道距離を 3000km とし，サンフランシスコから横浜までの距離は海上保安庁（2003）より野島埼沖経由で 4536 海里すなわち 8401km と設定した。



第９図　米国におけるバイオエタノールプラント

出所：RFA 作成資料.

アメリカ国内の鉄道輸送に関しては，国土交通省（2007）の鉄道輸送エネルギー原単位を用いてエネルギー投入量を求めた。国土交通省（2007）の鉄道輸送エネルギー原単位は日本国内のデータであり，日本より鉄道電化率の低いアメリカに適用するとエネルギー投入量の過小評価になる可能性がある。しかし，アメリカにおける鉄道輸送のエネルギー原単位の適当なデータが見つからなかったためやむを得ずこの数値を適用した。また，海上輸送に関しては，同じく本章での分析結果の比較対象としたブラジルさとうきび原料のバイオエタノールの LCA 分析を行った三菱総合研究所（2003）と同じ原単位を用いた。さらに，海上輸送後の国内でのバイオエタノール配送についても，三菱総合研究所（2003）と同一の設定すなわち日本国内におけるバイオエタノール輸送を内航およびタンクローリーとし，輸送距離を 209km としてエネルギー投入量を計算した。

（３）システム境界の変更

Pimentel and Patzek(2005)では，バイオ燃料生産に伴うエネルギー投入に施設建設や輸送機械の調達に伴うエネルギー投入もカウントしている。本章における分析では，これら施設建設や輸送機械の調達に伴うエネルギー投入はシステム境界外となっており，Pimentel and Patzek(2005)におけるこれらのエネルギー投入は除外した上で本章の分析と比較することが必要である。

そこで，Pimentel and Patzek(2005)においてエネルギー投入として計算されている項目のうち，原料生産ステージにおける労働力，農業機械，灌漑設備については比較対象から除外した。また，バイオエタノール生産ステージにおいても，水，ステンレス，鉄鋼，セメントが投入材として挙げられているが，これらについても評価の対象から除外した。

（４）GHG 排出量の算出

Pimentel and Patzek(2005)では，エネルギー収支を計算しており GHG 排出量は計算されていない。しかしながら，本章の分析の中心は GHG 削減効果の計測であり，比較対象となるアメリカのバイオ燃料生産の事例においても，GHG 排出量を算出して比較可能とすることが求められる。そこで，Pimentel and Patzek(2005)のエネルギー投入量から GHG 排出量を算出した。

まず，原料生産ステージにおける GHG 排出量の推計について，Pimentel and Patzek(2005)には投入財および投入エネルギーの項目ととうもろこし作付面積 1ha あたりの投入量が物量単位で示されている。また，アメリカにおける 1000KL のバイオエタノールの生産には，310ha のとうもろこし作付けが必要と計算される。そこで，肥料などの投入財については，ha あたり投入量に必要作付面積を乗じて物量単位の投入量を算出した。

（ha あたり投入物量）×（とうもろこし作付面積）＝（投入財物量単位投入量）

一方，軽油，重油，ガソリンといった化石燃料については，1ha あたりの投入量が物量単位と熱量単位の双方で記載されている。しかしながら，物量単位と熱量単位では投入量の計算が一致しないことが判明した。例えば軽油について見ると，1ha に投入されるエネルギー量（熱量単位）は 100 万 3,000kcal とある。軽油は 1L あたり 9,146kcal の発熱量を持つので，物量単位に換算すると，1ha あたり 109L となる。一方，Pimentel and Patzek(2005)には，とうもろこし作付面積 1ha あたりの軽油投入量は 88L とあるので，20%以上もの誤差が生じるのである。Pimentel and Patzek(2005)では，どのような投入エネルギーの算出方法が採用されているかが確認できないため，誤差の原因をフォローすることができない。そこでここでは化石燃料の発熱量が各国共通であることを鑑み，発熱量から化石燃料の物量投入量を計算することとした。

（ha あたり投入エネルギー量）×（とうもろこし作付面積）＝（全投入エネルギー量）
（全投入エネルギー量）÷（化石燃料発熱量原単位）＝（化石燃料物量単位投入量）

このほか，バイオエタノール生産ステージについて，Pimentel and Patzek(2005)では蒸気と電力が投入エネルギーとして計上されている。このうち蒸気については，重油ボイラーを用いて発生させるものと仮定し，エネルギー量を重油換算で計上した。電力については，

（ha あたり電力・重油エネルギー量）×（とうもろこし作付面積）＝（全電力・重油投入エネルギー量）
（全電力・重油投入エネルギー量）÷（電力・重油熱量原単位）＝（電力・重油物量単位投入量）

という計算方法を用いて物量単位の投入量を求めた。

（５）副産物との環境負荷の配分

とうもろこしを原料としてバイオエタノールを生産する場合，生産方式はドライミル方式とウェットミル方式の２通りがあり，それぞれの場合に副産物が発生する。ドライミル方式の場合は副産物として DDGS（Distiller's Dried Grains with Solubles）が，ウェットミル方式の場合は，コーンスターチ，コーンシロップという食品にも利用できる副産物のほか，コーン・グルテンフィード，コーン・グルテンミールといった副産物が発生する。DDGS およびコーン・グルテンフィード，コーン・グルテンミールは栄養価が高く家畜飼料に適しており，バイオエタノール生産が盛んな米国中部コーンベルト地帯の周辺の畜産農家では家畜飼料としてこれら副産物を使用している。アメリカにおけるバイオエタノール生産の急速な拡大は，DDGS の供給も急速に拡大させる一方で，原料となるとうもろこしの需要を逼迫させることから，DDGS の飼料需要は今後も拡大すると考えられる。

Pimentel and Patzek(2005)では，バイオエタノール製造にはドライミル方式を前提として計算がなされており，DDGS が副産物として発生することになる。LCA 分析のルールでは，ある生産物の製造過程で有価の副産物が発生する場合，環境負荷は副産物にも配分される。したがって，DDGS が副産物としての経済的な価値を有するのであれば，環境負荷の配分が必要になる[24]。環境負荷の配分の基準には，物量重量，経済価値，含有エネルギー量，投入エネルギー量などいくつかあり，そのうちのどれを採用するかによって LCA 分析の結果も大きく異なってくる（補論２参照）。

Pimentel and Patzek(2005)では，DDGS の供給は今後急速に拡大し供給過剰状態に陥ること，大量に発生した DDGS はコーンベルト地帯だけでは需要が足りず，長距離の輸送が必要となり，コスト的に採算が取れなくなることなどから，DDGS を廃棄物とみなし環

境負荷の配分を行っていない。しかしながら，現時点では現実として DDGS がコーンベルト周辺の畜産農家に有償で引き取られているのも事実であり，このことからは DDGS が無価値の廃棄物であるとは言い難い。そこで，ここでは DDGS を有価の副産物とみなして環境負荷の配分を行うことにした。配分基準には経済価値基準を採用し，バイオエタノールと DDGS の比率を 87 : 13 に設定した[25]。経済価値基準を採用した理由は，エネルギー含有量などの基準はデータの取得に難があり，また，物量基準では副産物に主産物よりも多くの環境負荷が配分される可能性があり，このような場合にはバイオエタノールの適切な評価と言えないと考えたためである。

以上の前提条件に基づきアメリカとうもろこし原料のバイオエタノールを輸入した場合の GHG 排出量を計測した。計測結果は第 2 節で示したとおりである。

補論２　エネルギーおよび環境負荷の配分方法

（１）はじめに

これまで，LCA 分析においてバイオエタノールの GHG 削減効果を定量的に評価してきたが，副産物とバイオエタノールとのエネルギーおよび環境負荷の配分方法にはいくつかの方法があり，これまでに(1)物量基準，(2)含有エネルギー基準，(3)投入エネルギー基準，(4)経済価値基準，(5)置き換え法などの各種配分方法が提示されている。これらの配分方法のうちどれを採用するかによって，LCA 分析の結果は大きく左右される。これを具体的に示す事例として Shapouri et al. (1995)の研究成果を紹介しよう。 Shapouri et al. (1995)では，各種配分方法の適用によって，どのくらい配分割合およびエネルギー収支が異なるかを計測している（第８表）。これによると，エタノールへの配分割合が最も高いのが置き換え法でその割合はバイオエタノール：副産物＝81:19 で，逆に最もエタノールへの配分割合が低いのは物量基準の 48:52 となっている。また，Gruson (2008)は，バイオ燃料と副産物の間の GHG 配分について，いくつかの方法を用いてその結果の違いを分析しており，採用する配分方法いかんでバイオ燃料の GHG 排出量（燃料熱量単位あたり：t-CO_2/GJ-fuel）に２倍以上の開きがあることを指摘している。これらのことからも，どのような配分方法を適用するかによって，LCA 分析の結果が大きく異なってくることが示唆される。また，Kim and Dale(2002)では，配分基準が他のどの要因よりも最も大きく結果に影響すると主張している。このように配分方法の決定は，LCA 分析の過程においても重要な部分であることがわかる。

ここでは LCA 分析におけるエネルギーおよび環境負荷の配分方法について簡単に解説する。

（２）物量基準による配分

物量基準による配分とは単に生産物の質量によって環境負荷を配分する方法であり，配分基準としては最も単純で明示的な方法と言える。しかしながら，生産物に含まれる水分量によって，質量そのものが変化する場合もあり，また，単に質量の比較であれば主産物と副産物の関係とは無関係であるため，仮に主産物よりも副産物のほうが大きな質量であれば環境負荷は副産物に多く配分されてしまうという欠点が生じる。

第8表　配分基準による配分割合とエネルギー収支の違い

		エネルギー配分割合		エネルギー収支
		バイオエタノール	副産物	
エネルギー含有量基準	ウェットミル	57%	43%	1.68
	ドライミル	61%	39%	1.71
	加重平均	58%	42%	1.69
市場価値基準	ウェットミル	70%	30%	1.38
	ドライミル	76%	27%	1.39
	加重平均	72%	28%	1.38
置き換え法	ウェットミル	81%	19%	1.21
	ドライミル	82%	18%	1.30
	加重平均	81%	19%	1.24
生産物物量基準	ウェットミル	48%	52%	1.96
	ドライミル	49%	51%	2.09
	加重平均	48%	52%	2.02

出所：Shapouri et al.(1995).

注1 値はバイオエタノール1ガロンあたりで計算されたものである.
2 とうもろこし原料のバイオエタノール生産にはドライミル方式とウェットミル方式の2つの製造方法があり，それぞれの製造方法で発生する副産物も異なる.

（３）経済価値基準による配分

経済価値基準による配分とは，生産物の市場価値（価格）を基準に環境負荷を配分する方法である。物量基準とともに明示的な方法であるとともに，通常は主産物のほうが価格が高くなることから，主産物と副産物の位置づけが環境負荷の配分に反映されるという利点がある。しかしながら，経済価値については生産物そのものの影響のみならず，市場における需要・供給の状況，競合生産物との関係など，目的の生産物とは直接的に関係のない要因によって大きく影響を受けること，本章の事例における麦稈のように市場が確立していない生産物の場合にはこの配分基準が適用できないこと，さらに市場価格は常に変動することから，配分基準が不安定になるという欠点がある。このうち，３つ目の欠点については，問題の解決のために長期間にわたる平均市場価格を配分基準に採用することも一部の研究事例において行われている。

（４）含有エネルギー量による配分

生産された生産物に含まれるエネルギー量を比較し，それに応じてエネルギーおよび環

境負荷を配分する方法である。この方法はそれぞれの生産物が持つエネルギー量で明確に配分基準が決定されるため，恣意性の少ない配分方法である。しかしながら，エネルギー量は食物の栄養価を評価するための指標であることから，この配分方法は食料や飼料など人間や動物が食する生産物に適用することが望ましく，燃料やその他の生産物に対して適用するのはふさわしくないという指摘がある（Shapouri et al.(1995) p.11）。

（５）投入エネルギー量による配分

生産された生産物に投入されたエネルギー量を基準として環境負荷を配分する方法である。この基準による配分は投入されたエネルギー量を複数の生産物の間で明確に区分できる場合にのみ適用できる。したがって，両者のエネルギー量が明確に区分できない場合には配分基準として適用することができないという問題点が存在する。

（６）置き換え法

置き換え法とは生産物の片方を代替する財の環境負荷によって計算する方法である。例えば，ある生産過程から生産物 A と生産物 B の２つが生産されるとし，全環境負荷は生産物 A の生産による環境負荷と生産物 B の生産による環境負荷に分割可能と仮定する。すなわち，

$$E = E_a + E_b$$

（E：全環境負荷，E_a：生産物 A の生産に伴う環境負荷，E_b：生産物 B の生産に伴う環境負荷）

となる。ここでは E_a，E_b とも個別に計測することはできないものの，全環境負荷 E はすでに計測されているとする。その際，生産物 B については，その代替物として生産物 C が存在し，その生産に伴う環境負荷 E_c は個別に計測可能とする。このとき，E_b は代替物の環境負荷 E_c から産出できるとみなすのが置き換え法である。すなわち，$E_b = f(E_c)$ から $E = E_a + f(E_c)$ と計算されて，$E_a = E - f(E_c)$ から E_a および E_b（$= f(E_c)$）の環境負荷量を計測するのである。

この方法は，厳密な意味では環境負荷を配分する方法ではなく，環境負荷の恣意的な配分を回避する方法として提案されたもので，生産システムを拡張することからシステム拡張法とも呼ばれる。LCA 分析の規格を定めた ISO14040 番台においても，置き換え法によって配分をなるべく回避するようにすべきことが明記されている。

このような置き換え法は前述のとおり，恣意的基準による配分を回避できるという利点があるものの，置き換え法の実施にはこれまでより多くの生産システムにおいて環境負荷を計測する必要が生じる点が欠点である。上記の例では，生産物 A と生産物 B が生産され

るシステムにおける環境負荷を計測するために，全く別の生産物 C の生産システムにおける環境負荷を計測しなければならない。また，E_cが個別に計測可能であればよいが，仮に生産物 C が生産物 D と結合生産物であるとした場合には，さらに生産物 C を代替する生産物の環境負荷計測が必要となってくる。このように，配分を回避することが目的でもそのシステムは非常に複雑になるという点が問題点として挙げられる。また，この手法はバイオエタノールとガソリンなど他の燃料との環境負荷を比較するには適用可能だが，バイオエタノール生産における導入技術の違いによる環境負荷発生量の差を評価するためには，適用することはできないという問題点も生じる。

このような置き換え法をバイオ燃料の LCA に適用した事例は，Shapouri et al. (1995), Wang （2000），Kim and Dale(2002)がある。Kim and Dale(2002)では，米国産とうもろこし原料バイオエタノールの LCA 分析に置き換え法を適用し，環境負荷を規定する要因のうちどの配分基準を採用するかが他のどの要因よりも最も大きく結果に影響することを明らかにしている。一方で，Kim and Dale(2002)では他の基準による配分を完全に回避するための置き換え法適用のために，バイオエタノール自体を含め 5 つもの生産システムを導入して計算しており，やはり生産システムの複雑さ，計算の煩雑さは免れない。

〔注〕

(1) 農林水産省（2007）によると，2011 年までに 5 万 KL の国産バイオ燃料の生産を目指している。さらには，2030 年までに国内におけるバイオ燃料の生産量を 600 万 KL まで拡大する目標を掲げている。

(2) 農林水産省（2007）によると，ブラジルのさとうきび原料バイオエタノールを輸入した場合の国内価格は関税を含め 146 円/L，日本のさとうきび糖蜜原料バイオエタノールは 144 円/L，規格外小麦原料バイオエタノールは 152 円/L である。これらの価格には関税（ブラジル産の場合のみ），ガソリン税が含まれているが，小売マージンおよび流通経費は含まれておらず小売段階での価格はさらに高くなる。また，小泉（2007）によると，2003 年におけるブラジルのバイオエタノール輸出量は 76.7 万 KL で，バイオエタノールの世界最大の輸出国となっている。

なお，農林水産省の 2009 年の推計では，ブラジルのさとうきび原料バイオエタノールを輸入した場合の国内価格は関税込み，小売マージン抜きで 122 円/L と試算されている。

(3) バイオ燃料の効果に疑問を投げかける論文は Peters(2007)のほか，Lieberman(2002), Giampietro et al(1997)など多数見られる。また，2007 年 6 月 19 日に開催された当所セミナー「OECD 将来を見通すための OECD における政策分析－農業見通しとバイオ燃料への適用－」において，講師のルーク・ブーネカンプ OECD 貿易･農業局農業･食料貿易･市場課長は，OECD の公式見解として，バイオ燃料の環境への効果は疑問であると発言し，その後発表された OECD-FAO Agricultural Outlook 2007-2016（OECD, FAO(2007)）に

おいても，バイオ燃料需要の高まりが農産物市場に抜本的な変化をもたらし，多くの農産物の価格が世界的に上昇する可能性があることを警告している。さらには，政府のバイオマス・ニッポン総合戦略推進会議においても，「バイオ燃料の生産過程において，必要となる化石燃料や排出する CO_2 量は極力少なくすることが重要である」との見解が示されている（バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議（2007））。

(4) 本節の一部は，増田清敬「国産バイオエタノールのライフサイクル評価—北海道産規格外小麦を事例として—」（平成 19 年度日本農業経営学会研究大会報告論文）を，著者の承諾を得たうえで林が分析シナリオを一部修正し，本文を加筆・修正したものである。本稿における誤りはすべて林の責任である。

(5) LCA は，製品のライフサイクルを通じた環境影響を評価する手法であり（石谷・赤井（1999）），本章の課題を解明するにあたり，最も適した手法と考えられる。近年，例えば，Pimentel and Patzek(2005)，Shapouri et al. (2002)，Kim and Dale(2006)など，バイオ燃料について LCA 分析による評価を行った研究が数多く発表されているが，十勝地方産規格外小麦原料のバイオエタノールを対象に LCA 分析を用いて評価した研究は，筆者らが行った Masuda（2008）や Masuda et al.（2008）がある以外，筆者の知る限り存在しない。

(6) ホクレンの計画では，清水町におけるエタノール生産には規格外小麦のほか，てんさいも使われる予定である。

(7) 本モデルでは，あくまで想定事例をベースとしており実証データの蓄積がないことから，新エネルギー・産業総合開発機構（2003）によるバガス・タピオカ利用のエタノール製造プラントデータを援用した。

(8) 現在は忠類村が幕別町に編入合併され 19 市町村となっているが，分析は合併前の 20 市町村分のデータを用いて行っている。

(9) 本稿の基礎とした増田（2007）では，清水町のプラントで製造したバイオエタノールを苫小牧および釧路に輸送して E3 を製造するシナリオとしており，E3 の製造場所が本分析とは異なる。

(10) 北海道バイオエタノール株式会社は，北海道農業協同組合中央会が中心となり 2007 年 6 月に設立された会社である。

(11) りゅうせきへのヒアリング調査によると，宮古島におけるバイオエタノール生産では，E3 生産の際，ガソリンとバイオエタノールのタンクから混合比を調節するバルブを介してブレンダーへ送油しドラム缶へ充填する方式で行われており，特に大規模な施設は設置されていない。

(12) 比較対象となるブラジルさとうきび産のバイオエタノール生産事例（三菱総合研究所（2003））においても燃料混合ステージの GHG 発生は計算されていない。

(13) 仮に重量比による配分基準を採用した場合，規格外小麦生産量よりも麦稈生産量の方が

多いため，本来副産物である麦稈に環境負荷が多く配分されてしまうという問題点がある。また，十勝地方においては，麦稈は厩肥と交換される等，経済的取引が行われないことも多いという実態を鑑みると，経済的価値比による配分基準も適当ではないと考えられる。

(14) このような土地利用形態の変化による GHG 排出量の増大は，発展途上国におけるバイオ燃料生産の場合特に大きな問題となる。この点を指摘する研究には，Fehrenbach (2008) や Hill (2008)などがあり，これら研究についての詳細は第 1 章第 3 節を参照されたい。

(15) 中東に大きく依存するエネルギー供給を分散させるという意味では，ブラジルからのバイオエタノールの輸入にも意義があるが，これはエネルギー自給の問題ではなく，エネルギー保障の問題である。

(16) 増田他（2006）は家畜ふん尿を利用するバイオガスプラント導入がエネルギー消費量の削減，地球温暖化の防止に貢献することを明らかにしている。また，規格外小麦に関連するバイオマスエネルギーとしては，麦稈や発酵副産物の利用も考えられる。しかし，麦稈は GHG 削減には有効であるがバイオエタノール生産費が高くなることが指摘されており（LowCVP(2004)），発酵副産物は通常飼料用として販売されることでバイオエタノール生産費の低減に寄与している（十勝圏振興機構（2005））。それゆえ，これらをバイオマスエネルギーとして利用するためには克服すべき課題がまだいくつか残されている。

(17) このことを逆に捉えると，食料との競合を起こさないとも言える。

(18) 筆者が 2006 年 12 月に行った北海道農業協同組合中央会ヒアリング調査によると，小麦とてんさいの双方を原料にすることによるデメリットとして，原料の切り替えの際に原料タンクの洗浄が必要とのことである。

(19) 耕作放棄地への作付けに関しては，採算性，労働力の確保などの問題も存在するが，ここではあくまで環境面に限定した分析を行い，採算性，労働力問題などの検討は行わない。

(20) ここでは，化学肥料投入量が削減されることによる機械の燃料消費量削減は生じないものと仮定している。これは，化学肥料とふん尿スラリーの散布時期にずれがあり，化学肥料が削減されても化学肥料散布のための農業機械の稼働回数は削減できないことと，農地面積が変わらなければ化学肥料の散布量が削減されても機械を稼働させる時間や走行距離も変わらないためである。

(21) 2005 年の農林業センサスによると，清水町の乳牛・肉牛飼養頭数は 30,548 頭である。スラリー10 割でふん尿を処理している酪農家の割合を考慮しても，1,000 頭規模のバイオガスプラントにふん尿スラリーを搬入する場合，清水町内のみで十分調達することができると考えられる。

(22) 筆者が 2007 年 8 月に行った北海道別海町のバイオガスプラントでのヒアリング調査によると，発生した消化液はふん尿を搬入した酪農家へ還元しているが，牧草の収量増加効果が認められ，ふん尿を搬入していない農家からも消化液提供の要望が多いとのことである。ただし，消化液の発生量が限られていることから，別海町のバイオガスプラントでは

ふん尿搬入農家以外への消化液提供は行っていない。

(23) USDA(2002)によると，アメリカ国内では燃料用エタノールの 48%が鉄道輸送，38%がトラック（ローリー）輸送，14%がバージ輸送である。

(24) ただし LCA 分析では無価値の副産物は廃棄物とみなされ，環境負荷の配分は行わないこととなっている。

(25) 経済価値は『AMS レポート』に掲載された 2007 年 7 月の DDGS 価格をバイオエタノール 1 ガロンの値に換算した。

〔引用文献〕

バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議（2007）『国産バイオ燃料の大幅な生産拡大』。

Fehrenbach, H.,(2008) “GHG Accounting Methodology and Default Data According to the Biomass Sustainability Ordinance (BSO)” Presentation for 2nd GBEP Task Force Meeting on GHG Methodologies in Washington D.C. on 6-7 March 2008.

船崎敦・種田克典（1999）「自動車 LCA のためのインベントリ作成の考え方（1）—石油系燃料モデルと燃料油製造インベントリ—」,『自動車研究』21（12），pp.716-723。

Giampietro M., Ulgiati S., and Pimentel D. (1997): “Feasibility of large-scale biofuel production” *Bio Science 47(9)*, pp587-600.

Gruson, J. F., (2008) ”GHG methodologies for biofuels :French developments” Presentation for 2nd GBEP Task Force Meeting on GHG Methodologies in Washington D.C. on 6-7 March 2008.

Hill, J.,(2008) “Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt” Presentation for 2nd GBEP Task Force Meeting on GHG Methodologies in Washington D.C. on 6-7 March 2008.

北海道電力（2006）『ほくでんサステナビリティレポート 2006』。

北海道開発土木研究所（2005）『積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト（平成 12～16 年度）最終成果報告書』。

北海道農政部（2004）『北海道農業入門　新規就農者向けテキスト〔畑作編〕』。

北海道農政部（2005）『北海道農業生産技術体系（第 3 版）』。

北海道立農業畜産試験場（2004）『家畜ふん尿処理・利用の手引き』。

北海道立十勝農業試験場（1999）「畑作物に対する牛糞尿スラリーの施用効果と利用法」『平成 10 年度北海道農業試験会議成績会議』。

石谷久・赤井誠監修（1999）『ISO 14040/JIS Q 14040　ライフサイクルアセスメント—原則及び枠組み—』，産業環境管理協会。

環境省（2002）『平成 14 年度温室効果ガス排出量算定方法検討会農業分科会報告書』。

環境省（2006）『日本国温室効果ガスインベントリ報告書』。

唐澤哲也・郷達也「米国における家畜飼料の利用状況とエタノール副産物の活用について」『月

報 畜産の情報（海外編）』213（2007 年 7 月号），pp.52-65。
Kim S., and Dale B. E., (2002)"Allocation Procedure in Ethanol Production System from Corn Grain" *International Journal of Life Cycle Assessment 7(4)*, pp.237-243.
Kim S., and Dale B. E., (2006)"Ethanol Fuels: E10 or E85 –Life Cycle Perspectives" *International Journal of Life Cycle Assessment 11(2),* pp.117-212.
小泉達治（2007）『バイオエタノールと世界の食料需給』筑波書房。
古賀伸久（2004）「十勝地方の大規模畑作に対する LCA の適用」『北農』71（1），pp.8-16。
国土交通省（2007）『交通関係エネルギー要覧』平成 19 年度版。
Lieberman B. (2002) "The ethanol mistake: one bad mandate replaced by another" http://www.nationalreview.com/comment/comment-lieberman031202.shtml
LowCVP (2004) "Well-to-wheel evaluation for production of ethanol from wheat" The LowCVP Fuels Working Group.
増田清敬（2007）「国産バイオエタノールのライフサイクル評価―北海道産規格外小麦を事例として―」，平成19年度日本農業経営学会研究大会報告論文。
Masuda, K. (2008) "Does bio-fuel production in Japan have environmental advantages?: evaluating bio-ethanol production from substandard wheat in Hokkaido" 『農業経営研究』 46(1), pp.138-143。
Masuda, K., Hayashi, T., and Yamamoto, M., (2008) "Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Newly Introduced Processes in a Wheat-based Bio-ethanol Production System,"『2008 年度日本農業経済学会論文集』，pp.300-306。
増田清敬，和田臨，山本康貴，出村克彦（2006）「LCA を用いた地域資源循環システムの環境影響評価」『2005 年度日本農業経済学会論文集』，pp.397-404。
松本成夫，三輪睿太郎，袴田共之（1990）「農村地域における有機物フローシステムの現存量とフロー量の推定法」『システム農学』，6（2），pp.11-23。
三菱総合研究所（2003）『平成 15 年度新エネルギー等導入促進基礎調査：輸送用バイオマス燃料の導入可能性に関する調査研究報告書』。
ナビタイムジャパン（online）「NAVITIME」，http://www.navitime.co.jp/
南齋規介，森口祐一，東野達（2002）『産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）―LCA のインベントリデータとして―』。
日本化学会（1995）『化学便覧応用化学編第 5 版』。
農林水産技術情報協会（1996）『平成 7 年度新経営体育成エネルギー利用体系化調査：主要作目の作業体系におけるエネルギー消費原単位』。
農林水産技術情報協会（1997）『平成 8 年度新経営体育成エネルギー利用体系化調査：主要作目の作業体系におけるエネルギー消費原単位』。
農林水産省（2007）「国産バイオ燃料の大幅生産拡大」ホームページ，

http://www.maff.go.jp/j/biomass/b_energy/kokusanbio.html
農林水産省（2007）『食料・農業・農村政策審議会企画部会地球環境小委員会第一回会合資料』。
農林水産省北海道統計・情報事務所（2006）『北海道農林水産統計年報（農業統計市町村別編）平成 16～17 年』。
農林水産省北海道統計・情報事務所（2007）『北海道農林水産統計年報（農業統計市町村別編）平成 17～18 年』。
OECD, FAO(2007) ”OECD-FAO Agricultural Outlook 2007-2016”
小川 和夫，竹内 豊，片山 雅弘（1998）「湿性火山性土における簡易耕の導入が土壌の諸性質と作物の生育に及ぼす影響」『北海道農業試験場研究報告』150，pp.57-90。
尾和尚人（1996）「わが国の農作物の養分収支」『環境保全型農業研究連絡会ニュース』，33，pp.428-445。
Peters, G (2007) “Promoting Biofuels: Implications for Developing Countries” Presentation for 7th International Conference of the European Society for Ecological Economics in Leipzig, Germany on 5-8 June 2007.
Pimentel, D. and Patzek, T. W., (2005) "Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower" *Natural Resources Research 14(1),* pp.65-75.
Shapouri, H., Duffield, J. A., and Graboski, M. S., (1995) ”Estimating the Net Energy Balance of Corn Ethanol” *USDA Office of Energy Agricultural Economic Report No.721.*
Shapouri, H., Duffield, J. A., and Wang, M., (2002) "The energy balance of corn ethanol: an update" *USDA Office of Energy Policy and New Uses, Agricultural Report No.813.*
新エネルギー・産業総合開発機構（2003）『バガス・タピオカ利用エタノール製造モデル事業実施可能性調査』。
十勝圏振興機構（2005）『北海道十勝地域の規格外農産物及び農産加工残渣物利用におけるバイオエタノール変換システムに関する事業化可能性調査報告書』。
U.S. Department of Agriculture (2002) “USDA’s 1998 ethanol cost-of-production survey”, *Agricultural Economic Report, 808.*
Von Blottnitz, H., and Curran, M. A. (2007) “A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective”, *Journal of Cleaner Production 15(7)*, pp.607-619.
Wang, M. (2000) “Greet1.5 –Transportation Fuel-Cycle Model”, *Argonne National Laboratory Technical Report*,
http://www.transportation.anl.gov/software/GREET/publications.html