第35回環境システム研究論文発表会講演集　2007年10月

栽培系バイオマス由来のバイオエタノール活用による二酸化炭素排出削減ポテンシャルの推計

加用　千裕[1]・花木　啓祐[2]・荒巻　俊也[3]・石井　暁[4]

[1]学生会員　東京大学大学院　工学系研究科　都市工学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）
E-mail:kayo@env.t.u-tokyo.ac.jp

[2]正会員　東京大学教授　工学系研究科　都市工学専攻（同上）
E-mail:hanaki@env.t.u-tokyo.ac.jp

[3]正会員　東京大学准教授　工学系研究科　都市工学専攻（同上）
E-mail:aramaki@env.t.u-tokyo.ac.jp

[4]正会員　東京大学客員研究員　工学系研究科　都市工学専攻（同上）
E-mail:ishii@csur.t.u-tokyo.ac.jp

日本全国の森林や草原においてエネルギー生産用の樹木や作物である栽培系バイオマスの生産ポテンシャルを都道府県ごとに推定し，ガソリンの代替燃料として注目されているバイオエタノールへの活用による CO_2 排出削減効果を推計した．バイオマス栽培可能地面積は日本全体で国土面積の約 40%に相当する森林（89%）および草原（11%）と推定され，バイオマスの年間生産ポテンシャルは発熱量換算で約 4300 PJ となり，日本全国の年間一次エネルギー総供給量の 19%に相当する．これら栽培系バイオマスの全量をバイオエタノールとして活用すると，日本全国のガソリン需要量の 78%を代替可能な供給ポテンシャルがあり，その際の CO_2 排出削減量は年間約 101 Mton と推計され，1990 年時の日本全国 CO_2 排出量の約 10%に相当する．

Key Words : *plantation-biomass, bio-ethanol, forest, grassland, production potential, CO_2 reduction*

1. はじめに

将来的な低炭素社会の構築へ向けて，持続的に生産と消費を繰り返すことにより大気中のCO_2濃度に影響を与えないカーボンニュートラル資源であるバイオマスの活用が国内外で注目されている．このため，地球規模でのバイオマス資源量の推定[1), 2)]，日本国内における廃棄物系バイオマスおよび未利用系バイオマスの利用可能量の推定[3), 4)]や休耕地を利用したエネルギー作物の生産可能量に関する研究[5)]等が行われている．

また，バイオマスのエネルギー変換技術として，ガソリンと代替利用できるバイオエタノールが大きな話題となっており，高効率なバイオエタノール変換技術の開発に関する研究[6), 7)]やバイオエタノールの生産に関わるエネルギー収支およびCO_2排出量の評価[8), 9)]が国内外で行われている．バイオエタノールの原料となるバイオマスは，主な組成成分の違いから，単糖系（サトウキビ，テンサイ等），デンプン系（トウモロコシ，コメ等）およびセルロース系（木質，草本）に分類される．この中で，樹木や牧草等のセルロース系バイオマスは，単糖系およびデンプン系バイオマスと異なり，食料資源と競合関係にならないバイオマス資源であることから，今後の活用可能性や温室効果ガスの排出削減効果が期待されている．

特に日本は，国土面積の約7割が森林であり，セルロース系バイオマスの活用ポテンシャルは大きいと考えられるが，今後，国内の森林において，エネルギー利用を目的とした樹木（早生樹）をどの程度生産できるのか，それらの有効活用により温室効果ガスの排出をどれくらい削減できるのかを評価することが長期的な対策を立案する上で必要である．しかしながら，想定される植林地の気候条件，植林と伐採・搬出の上で問題になる傾斜度などの地形要件について，これらを反映して推計を行った研究事例はほとんど見られない．そこで，本研究では，日本国内の森林および草原を対象として，エネルギー生産用の早生樹木や早生作物である栽培系バイオマスの生産ポテンシャルを，気候条件や傾斜条件を考慮することにより現状に即して推計する．さらに，これら栽培系バイオマスのバイオエタノール活用に関わるライフサイクルCO_2排出量を算定し，ガソリンとの代替利用に伴うCO_2排出削減のポテンシャルを評価する．

2. バイオマス栽培対象地および栽培収穫周期

(1) バイオマス栽培対象地

自然林は自然保護の観点から保全する必要があると考え，バイオマスの栽培対象地は，二次林地（人為的伐採後に自然成立した樹林地）および植林地（人為的伐採後に植栽が行われた樹林地），また，かつて農耕地として利用されていたものの現在は農作物が栽培されていない耕作放棄地を含む二次草原および牧草地等の人工草原とした．図-1 に示した日本全体の土地利用において，バイオマス栽培対象地の土地面積は，国土面積の約 55%（二次林地 25%，植林地 25%，二次草原 2%，人工草原 3%[10]）を占める．また，図-2 は都道府県別のバイオマス栽培対象地面積[10]を示したもので，北海道が大きなポテンシャルを有していることがわかる．

(2) 対象バイオマス種

現状の植林地および二次林地において，主に住宅用木材として育林されてきたスギ，ヒノキ，マツ等の従来樹木からエネルギー生産用木材として初期成長の早い早生樹木への樹種転換の可能性を検討する．対象とした早生樹種は，亜寒帯・温帯気候が生育適地であるヤナギ，亜熱帯・熱帯気候が生育適地であるアカシアを選定した．また，かつて薪炭材として利用されていた比較的早生な樹種として，亜寒帯・温帯気候に適したカンバ，暖温帯・亜熱帯気候に適したコジイ，さらに，日本全体に生育地域が広がるササを対象樹種として選定した．

また，人工草原および二次草原におけるバイオマス栽培対象作物種は，単糖系バイオマスとしてサトウキビ，セルロース系バイオマスとして牧草である青刈コーンおよび青刈ソルゴーを選定した．

(3) バイオマス栽培収穫周期

植林地および二次林地におけるバイオマス栽培対象樹種の中で，早生樹木であるヤナギおよびアカシアは，緩傾斜地における短周期（4年周期[11]）での農業的栽培収穫システムを想定し，比較的早生な従来樹種であるカンバおよびコジイは，中傾斜地における中周期（10年周期）での林業的栽培収穫システムを想定した．また，上記4樹種が生育不適な地域においても生育可能なササは，緩傾斜地における短周期収穫システムおよび中傾斜地における中周期収穫システムのどちらも想定することとした．このように，中傾斜地において数年間隔の短周期ではなく10年間隔程度の中周期で樹木の育林を行うことは，山地における土砂災害防止機能を維持する上で重要である．

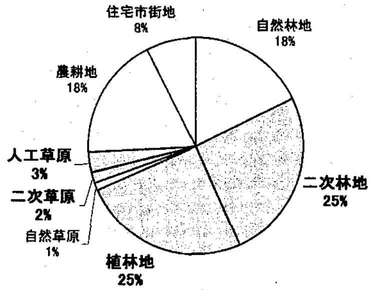

図-1　日本の土地利用

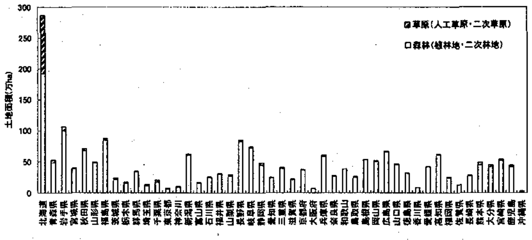

図-2　都道府県別バイオマス栽培対象地

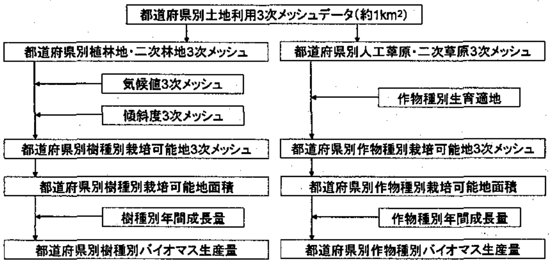

図-3　栽培系バイオマス生産ポテンシャル推定フロー

3. 栽培系バイオマス生産ポテンシャル推定手法

(1) 推定フローおよび使用したデータベース

栽培系バイオマス生産ポテンシャルの推定は地理情報システム（GIS）を活用し，データベースとして全国都道府県別の土地利用状況を把握可能なメッシュデータである「自然環境保全基礎調査植生調査 3 次メッシュ（約 1km^2）[10]」を使用した．土地利用状況を把握可能な 3 次メッシュデータは，この他に「国土数値情報：土地利用 3 次メッシュ[12]」，「農業センサス 3 次メッシュ[13]」等があるが，国土数値情報は，森林において自然林地，二次林地，植林地等の詳細な分類がなく，また，農業センサスは，土地利用の中の農耕地のみが対象とされており，本研究で用いるには問題点がある．一方，自然環境植生調査メッシュは，森林における詳細な分類が可能なだけでなくメッシュ内に優占する樹種も把握可能であること，また，草原においても牧草地および耕作放棄地等の詳細

な分類が可能であることから，本研究では上記メッシュデータを用いることとした．

図-3 に示した栽培系バイオマスの都道府県別生産ポテンシャルの推定フローに従って，森林においては，都道府県別に植林地および二次林地メッシュエリアを抽出後，気候値3次メッシュデータ[14]および傾斜度3次メッシュデータ[15]をオーバーレイすることにより，樹種ごとに生育適地と判断される気候条件（3章（2）節）および傾斜条件（3章（3）節）によるバイオマス栽培可能地メッシュを抽出した．これらメッシュエリアの面積を算定し，この栽培地面積（ha）に樹種ごとの年間成長量（t-dry/ha/year）（3章（4）節）を乗じることにより，都道府県別樹種別の栽培系バイオマス年間生産ポテンシャル（t-dry/yearおよび高位発熱量換算 MJ/year）を推定した．

また，草原においても，都道府県別に人工草原および二次草原メッシュエリアを抽出後，都道府県別に作物種ごとの生育適地（3章（2）節）を選定し，都道府県別作物種別のバイオマス栽培可能地メッシュを抽出した．これらメッシュエリアの面積（ha）に作物種ごとの年間成長量（t-dry/ha/year）（3章（4）節）を乗じて，都道府県別作物種別の栽培系バイオマス年間生産ポテンシャル（t-dry/yearおよび高位発熱量換算 MJ/year）を推定した．

表-1 生育適地条件・栽培収穫周期・成長量・発熱量

樹木

	日最高最低気温		年降水量		傾斜度	栽培収穫周期	年間成長量	高位発熱量
	Min(℃)	Max(℃)	Min(mm)	Max(mm)	(°)	(year)	(t-dry/ha/year)	(GJ/t-dry)
ヤナギ	-16	31	700	2,860	0～15	4	20	19
アカシア	-1		300	3,000	0～15	4	18	20
カンバ	-20	29	670	2,870	16～30	10	14	19
コジイ	-5	32	1,120	3,580	16～30	10	13	19
ササ	-24	33	750	4,330	0～30	4, 10	8	16

作物

	作物栽培地（都道府県）	年間成長量 (t-dry/ha/year)	高位発熱量 (GJ/t-dry)
サトウキビ	鹿児島県・沖縄県	50	18
牧草コーン	北海道	19	17
牧草ソルゴー	本州・四国・九州	18	17

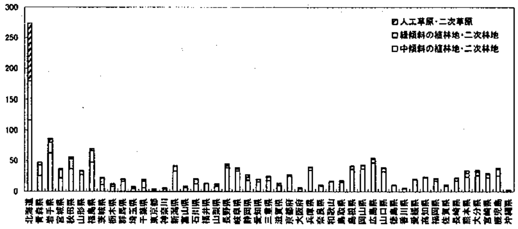

図-4 都道府県別バイオマス栽培可能地面積

(2) 気候条件

森林におけるバイオマス樹種ごとの生育気候条件は，「自然環境保全基礎調査植生調査3次メッシュ[10]」に気候値メッシュデータ（「メッシュ気候値2000年：日最高気温・日最低気温・年間降水量[14]」）をオーバーレイし，メッシュデータ上に確認される樹種（ヤナギ，カンバ，コジイ，ササ）と，このメッシュデータに対応する気候値により各樹種が生育可能な気候値範囲（日最高気温・日最低気温・年間降水量）を設定した（**表-1**）．なお，対象樹種のうちアカシアは，日本における生育地域が非常に少なく，メッシュデータ上には確認されなかったため，国際連合食糧農業機関（FAO）の樹種データベース（Ecocrop1&2[16]）から気候値範囲を設定した（**表-1**）．

また，草原におけるバイオマス作物種ごとの生育気候条件について，農林水産省の統計資料[17]によると，サトウキビは鹿児島県および沖縄県のみで生産されており，牧草ソルゴーは北海道以外の全都府県で生産され，牧草コーンは北海道においても生産されていることから，鹿児島県および沖縄県はサトウキビ栽培，北海道は牧草コーン栽培，その他の都府県は牧草ソルゴー栽培を想定することとした（**表-1**）．

(3) 傾斜条件

植林地および二次林地を緩傾斜地（農業的利用に適した0～15°の傾斜地[18]），中傾斜地（農業的利用には不適であるが林業的利用に適した16～30°の傾斜地[18]），急傾斜地（林業的利用にも適さない31°以上の傾斜地[18]）に3区分し，傾斜度0～15°の緩傾斜地における短周期栽培収穫システムおよび傾斜度16～30°の中傾斜地における中周期栽培収穫システムを想定した（2章（3）節）（**表-1**）．また，バイオマス栽培対象地に不適と判断される31°以上の急傾斜地については，対象地から除外し，バイオマスの栽培を想定しないこととした．

(4) バイオマスの年間成長量および高位発熱量

ヤナギ，アカシア，カンバ，コジイおよびササの年間成長量は，農林水産省「バイオマス変換計画[11]」において報告された国内の林業試験場等における実測値を引用した．また，サトウキビは沖縄県における実測値[19]を，牧草コーンおよび牧草ソルゴーは，国内の畜産試験場における実測値[20]を用いた（**表-1**）．また，各種バイオマスの高位発熱量は文献値[19, 21, 22]を引用したが，カンバ，コジイおよび牧草ソルゴーの発熱量値が入手困難であったため，カンバおよびコジイはヤナギの高位発熱量を，牧草ソルゴーは牧草コーンの高位発熱量を採用することとした（**表-1**）．

4. 栽培系バイオマス生産ポテンシャル推定結果

(1) バイオマス栽培可能地面積

図-4 は，森林（植林地，二次林地）および草原（人工草原，二次草原）においてバイオマスの栽培が可能と推定された土地面積を都道府県別に示している．日本全

体でのバイオマス栽培可能地面積は国土面積の約40%と推定され，中傾斜（傾斜度 16～30°）の植林地および二次林地面積が最も大きく全体の69%，次いで，緩傾斜（傾斜度 0～15°）の植林地および二次林地面積が20%，草原面積は11%であった．また，都道府県別にみると，北海道の栽培可能地面積が最も大きく全体の18%を占めた．

図-5 は，植林地および二次林地における樹種ごとのバイオマス栽培可能地面積を示している．北海道，東北，関東および中部地方は，亜寒帯・温帯気候に適した樹種であるヤナギおよびカンバの生育適地面積が大きく，近畿，中国，四国および九州地方には，暖温帯気候に適した樹種であるコジイの生育適地面積が大きい結果となった．また，亜熱帯・熱帯気候に適した樹種であるアカシアの生育適地は非常に少なく，北海道，東北および関東地方は生育不適地であり，中部，近畿，中国地方の一部と四国，九州地方が生育可能地となった．

また，地理情報システム（GIS）の空間解析機能を用いて，バイオマス栽培可能地と住宅市街地や農耕地との距離を測定した結果（図-6），住宅市街地メッシュおよび農耕地メッシュの外円半径 3 km 圏内にバイオマス栽培可能地面積の80%以上が，外円半径 10 km 圏内に栽培可能地面積の99%以上が位置していた．この結果から，栽培系バイオマスの主な消費地を住宅市街地および農耕地と想定すると，バイオマスの生産地から消費地までの輸送距離は最大 10 km と考えられる．

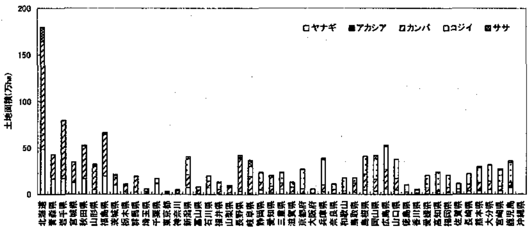

図-5 都道府県別樹種別栽培可能地面積

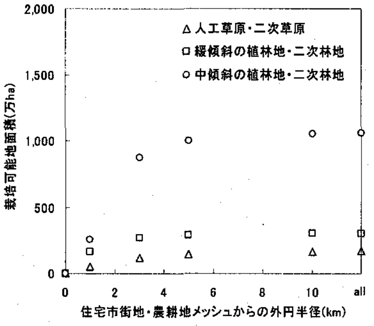

図-6 バイオマス栽培地と消費地との位置関係

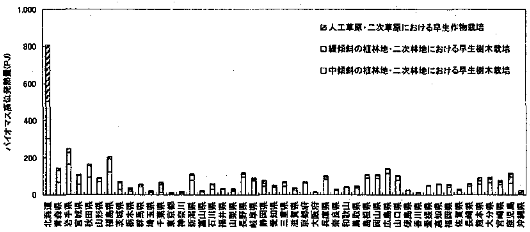

図-7 都道府県別栽培系バイオマス年間生産ポテンシャル

(2) 栽培系バイオマス生産ポテンシャル

図-7 は，樹種別および作物種別バイオマス栽培可能地面積（ha）に各樹種および各作物の年間成長量（t-dry/ha/year）を乗じることにより，栽培系バイオマスの年間生産ポテンシャル（t-dry/year を高位発熱量換算 MJ/year）を推定した結果を都道府県別に示している．日本全体での生産ポテンシャルは年間約 4300 PJ（中傾斜森林 62%，緩傾斜森林 25%，草原 13%）と推定され，これは日本の年間一次エネルギー総供給量[23]の 19%に相当する．特に，北海道の生産ポテンシャルが最も大きく，日本全体の約20%を占めた．生産ポテンシャルの小さい都府県は，東京都，神奈川県，大阪府，香川県であり，これらの地域各々の生産ポテンシャルは日本全体の 1%に満たない結果となった．

5. バイオエタノールのLCCO_2評価

(1) バイオエタノール製造量原単位

セルロース系バイオマス（樹木，牧草）および単糖系バイオマス（サトウキビ）の成分組成やエタノール製造プロセスの違い[19]を考慮して，バイオエタノール製造量原単位（MJ-ethanol/t-dry）を式（1）（セルロース系）および式（2）（単糖系）によって算出した．その結果，セルロース系のバイオエタノール製造量原単位は 7381 MJ-ethanol/t-dry（348 L-ethanol/t-dry），単糖系のバイオエタノール製造量原単位は 5751 MJ-ethanol/t-dry（271 L-ethanol/t-dry）となった．

「セルロース系バイオエタノール製造量原単位」

$$E = \frac{a \times b \times c \times d \times e \times f \times g \times i}{h} \qquad (1)$$

「単糖系バイオエタノール製造量原単位」

$$E = \frac{a \times e \times f \times g \times i}{h} \qquad (2)$$

ここで，

E：エタノール製造量原単位（MJ-ethanol/t-dry）

a : 原料バイオマスの糖分含有量（t/t-dry）
0.78[7]（セルロース系），0.47[24]（単糖系）
b : 粉砕収率 0.80[24]
c : 単糖生成率 1.11[24]
d : 加水分解収率 0.87[24]
e : エタノール生成率 0.51[24]
f : 発酵収率 0.90[24]
g : 精製収率 0.99[24]
h : エタノール比重（t/L）0.000789[24]
i : エタノール発熱量（MJ/L）21.20[24]

(2) $LCCO_2$評価対象範囲

表-2 は，バイオエタノール生産に関わるライフサイクル CO_2排出量（$LCCO_2$）を評価する際のシステム境界および対象としたエネルギー消費を示している．評価対象としたライフサイクル過程は，バイオマス栽培収穫過程，バイオマス輸送過程，バイオエタノール製造過程の3 過程である．バイオマス栽培収穫過程は，林業機械（樹木）および農業機械（作物）を使用する際の燃料エネルギー消費に伴う CO_2排出，これら機械および燃料を生産する際のエネルギー消費に伴う CO_2排出，また，バイオマス栽培時に必要となる種苗，苗木，肥料，農薬を生産する際のエネルギー消費に伴う CO_2排出を評価対象とした．バイオマス輸送過程は，バイオマス栽培地からバイオエタノール消費地までの往復距離におけるトラック輸送時の燃料エネルギー消費に伴う CO_2排出，これら燃料を生産する際のエネルギー消費に伴う CO_2排出を対象とした．また，バイオエタノール製造過程は，エタノール製造プロセス（前処理・糖化・発酵・蒸留・脱水）における電力および熱エネルギー消費に伴う CO_2排出，製造プロセスで必要となる薬品を生産する際のエネルギー消費に伴う CO_2排出を評価対象とした．

(3) $LCCO_2$算出方法および使用したデータ

a) 林業機械および農業機械使用時の燃料エネルギー消費に伴う CO_2排出量

農林水産省の統計値[25),26),27),28)]を引用した樹木および作物栽培収穫時の機械使用による燃料（ガソリン，軽油，灯油，潤滑油）消費量（L/ha/year）に，燃料種ごとの発熱量原単位[23)]（MJ/L）および CO_2 排出量原単位[23)]（t-CO_2/MJ）を乗じて，機械使用時の燃料エネルギー消費に伴う CO_2排出量（t-CO_2/ha/year）を算出した．なお，引用した統計値は，ヤナギ，アカシア，カンバ，コジイ，ササの栽培時については「育林費結果報告[25)]」のスギおよびヒノキの平均値を，収穫時については「素材生産費等調査報告書[26)]」のスギおよびヒノキの平均値を用いた．また，牧草コーンおよび牧草ソルゴーの栽培収穫時については「畜産物生産費[27)]」の青刈デントコーンおよび青刈ソルゴーの値を各々引用し，サトウキビの栽培収穫時については「工芸農作物等の生産費[28)]」を用いた．

表-2 バイオエタノールの $LCCO_2$評価対象範囲

システム境界	評価対象
バイオマス栽培収穫過程	林業機械･農業機械使用時の燃料エネルギー消費
	種苗･苗木･肥料･農薬･機械･燃料生産時のエネルギー消費
バイオマス輸送過程	トラック輸送時の燃料エネルギー消費（↑バイオマス栽培地からバイオエタノール消費地まで）
	輸送用燃料生産時のエネルギー消費
バイオエタノール製造過程	前処理･糖化･発酵･蒸留･脱水時の電力･熱エネルギー消費（↑発酵残渣による熱エネルギー回収を考慮）
	薬品生産時のエネルギー消費

b) 林業機械・農業機械・燃料・種苗・苗木・肥料・農薬生産時のエネルギー消費に伴う CO_2排出量

上記 a)項と同様の統計資料を用いて，林業機械（樹木）および農業機械（作物）の減価償却費，燃料費，種苗費（作物），苗木費（樹木），肥料費，農薬費（円/ha/year）に，これら各々の製品に該当する産業連関表（I-A）$^{-1}$型 CO_2 排出量原単位[29)]（t-CO_2/円）を乗じることにより，各種製品生産時のエネルギー消費に伴う CO_2排出量（t-CO_2/ha/year）を算出した．

c) トラック輸送時の燃料エネルギー消費に伴う CO_2排出量

図-6 において示した GIS による空間解析の結果を用いて（4 章（1）節），バイオマス栽培地からバイオエタノールの主な消費地となる住宅市街地および農耕地までの最大輸送距離を片道 10 km と仮定し，往復 20 km の距離をトラック輸送すると想定した．各種バイオマスの年間生産量（年間成長量）（t-dry/ha/year）に，貨物自動車エネルギー消費量原単位[30)]（MJ/t/km），軽油の CO_2排出原単位[23)]（t-CO_2/MJ），往復輸送距離 20 km を乗じることにより，トラック輸送時の燃料エネルギー消費に伴う CO_2排出量（t-CO_2/ha/year）を算出した．

d) トラック輸送用燃料生産時のエネルギー消費に伴う CO_2排出量

上記 c)項で算出した往復輸送距離 20 km における軽油消費量（MJ/ha/year）に，産業連関表（I-A）$^{-1}$型 CO_2排出量原単位（石油製品部門）（t-CO_2/MJ に換算）[29)]を乗じて，燃料生産時のエネルギー消費に伴う CO_2 排出量（t-CO_2/ha/year）を算出した．

e) バイオエタノール製造時の電力・熱エネルギー消費および薬品生産時のエネルギー消費に伴う CO_2排出量

バイオマスは主な組成成分の違いによってエタノール製造プロセスが異なるため，対象バイオマスを単等系（サトウキビ）およびセルロース系（樹木，牧草）に分類し，2 種類のバイオエタノール製造プロセスを想定した．

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）技術報告書[24)]を参考に，バイオエタノール製造時の電力・熱

エネルギー消費および薬品生産時のエネルギー消費に伴う CO_2 排出量を算定した．セルロース系バイオエタノールについては，NEDO 技術報告書[24]の前処理・糖化・発酵・蒸留・脱水工程における電力・熱エネルギー消費量および硫酸，中和剤生産時のエネルギー消費量を引用し，単糖系バイオエタノールについては，発酵・蒸留・脱水工程のみの電力・熱エネルギー消費量および中和剤生産時のエネルギー消費量を対象とした．また，バイオエタノール製造プロセスにおいて，セルロース系の樹木および牧草からはリグニンが，単糖系のサトウキビからはバガスが発酵残渣として発生する．これらの発酵残渣はバイオエタノール製造時の熱エネルギー源として有効利用することができるため，リグニンおよびバガスによる熱エネルギー回収も想定することとした．NEDO 技術報告書[24]によると，バイオエタノール製造プロセスにおいて必要となる熱エネルギー全量を発酵残渣（リグニン，バガス）によって回収可能である．

(4) バイオエタノールの $LCCO_2$ 評価結果

図-8 は，バイオエタノール生産に関わるライフサイクルエネルギー収支（バイオマス栽培地面積 1 ha 当たりのエネルギー収支（GJ/ha/year）として表示）をバイオマス種ごとに示している．栽培地面積 1 ha 当たりのエネルギー（バイオエタノール）生産量（図-8 中の生産（+）値）は，年間成長量の大きいサトウキビ（表-1）が最も大きく，ササが最も小さい結果となった．エネルギー消費量（図-8 中の消費（−）値）の内訳をみると，バイオエタノール製造過程におけるエネルギー消費量が最も大きいが，製造プロセスで発生する発酵残渣を熱エネルギーとして利用することにより製造過程における大部分のエネルギー回収が可能である．これらのエネルギー回収を考慮するとバイオエタノール生産量 1 GJ 当たりのエネルギー消費量（GJ/GJ-ethanol）は，サトウキビが 0.20 GJ/GJ-ethanol となり，最もエネルギー生産効率が高く，次いで，樹木カンバ，樹木コジイおよび牧草ソルゴーが 0.32 GJ/GJ-ethanol，樹木ヤナギおよび樹木アカシアが 0.33 GJ/GJ-ethanol，牧草コーンが 0.34 GJ/GJ-ethanol，ササが 0.38 GJ/GJ-ethanol となった．海外地域を対象としてセルロース系バイオエタノール生産時のエネルギー消費量を評価した既往研究[8), 9), 31), 32)]では，0.10 GJ/GJ-ethanol（switchgrass）[8)]から 1.45 GJ/GJ-ethanol（switchgrass）[9)]，1.57 GJ/GJ-ethanol（wood）[9)]まで文献値に大きなばらつきがあるが，日本国内を対象とした本研究の試算では，バイオエタノールとして生産されるエネルギーと比較して消費されるエネルギーが小さくなる結果となった（0.32 GJ/GJ-ethanol～0.38 GJ/GJ-ethanol）．

また，図-9 は，発酵残渣による熱エネルギー回収を考慮したバイオエタノールの $LCCO_2$ 排出量（kg-CO_2/GJ-

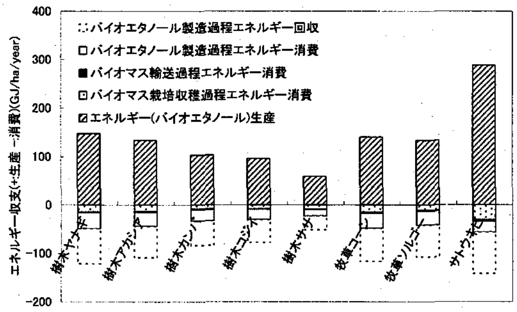

図-8 バイオエタノールのライフサイクルエネルギー収支

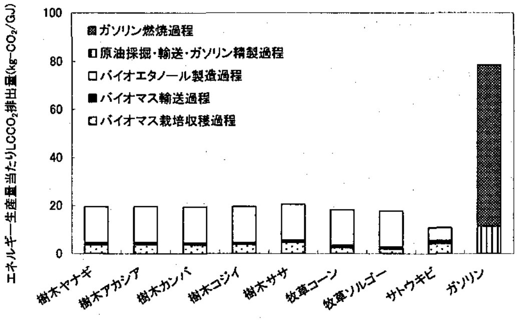

図-9 バイオエタノールのライフサイクル CO_2 排出量

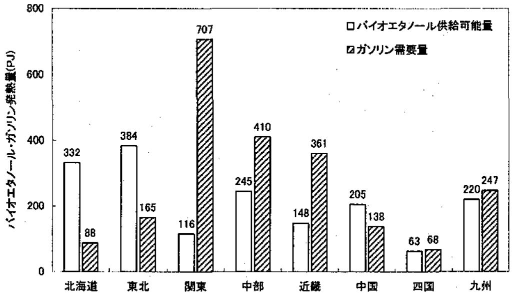

図-10 8 地方別バイオエタノール供給ポテンシャル

ethanol）評価結果とバイオエタノールの代替対象であるガソリンの $LCCO_2$ 排出量[33)]（kg-CO_2/GJ-gasoline）を示している．エネルギー収支評価結果（図-8）と同様に単糖系のサトウキビの CO_2 排出量が最も小さいが，セルロース系の樹木および牧草についてもガソリンと比較した場合の CO_2 排出量は非常に小さく，全てのバイオマス種において CO_2 排出量がガソリンの 1/4 以下となった．

6. 栽培系バイオマスのバイオエタノール活用による CO_2 排出削減ポテンシャル

図-10 は，日本全国 8 地方ごとのバイオエタノール供給可能量と現状のガソリン需要量[34)]を示している．北海

道および東北地方におけるバイオエタノールの余剰供給量によって関東地方におけるガソリン需要量の約80%を代替可能である．また，中国，四国および九州地方においては，これらの地域内で需給バランスがとれる結果となった．日本全体では，現状のガソリン需要量の78%を栽培系バイオマスからのバイオエタノールによって代替できることが分かった．

また，バイオエタノールの $LCCO_2$ 評価結果（5章（4）節）を用いて，栽培系バイオマス由来のバイオエタノール供給可能量全量（ガソリン需要量の78%）をガソリンと代替した場合の $LCCO_2$ 排出削減ポテンシャルを推計した．その結果，年間約101 Mt-CO_2のCO_2排出削減効果があることが分かった．これは，1990年時の日本全国CO_2排出量[35]の約10%，2005年時[35]の排出量の約8%に相当する．

7. まとめ

日本国内の森林および草原を対象として栽培系バイオマスの生産ポテンシャルを都道府県別に推計し，バイオエタノール化によりガソリンと代替利用した場合の供給ポテンシャルおよび $LCCO_2$ 排出削減量を評価した．その結果，以下の点が明らかになった．

- バイオマス種ごとに気候条件や傾斜条件を考慮した推計の結果，日本全体でのバイオマス栽培可能地面積は国土面積の約40%となること．
- 日本全体での栽培系バイオマスの生産ポテンシャルは年間約4300 PJ（発熱量換算）であり，北海道におけるポテンシャルが全体の約20%を占めること．
- 栽培系バイオマス由来のバイオエタノール全量をガソリンと代替利用すると，ガソリン需要量の78%に相当する供給ポテンシャルがあり，その際のCO_2排出削減量は約101 Mtと推計され，1990年時国内CO_2排出量の約10%に相当すること．

今後は，森林において住宅用木材および紙製品用木材等の従来樹木生産とエネルギー用の早生樹木生産との競合関係を考慮して，より現実的な推計を行い，住宅等他用途への利用も考慮した木質系バイオマスの有効活用方法を検討することが重要と考える．

なお，本研究は環境省地球環境研究総合推進費S-3-3「都市に対する中長期的な二酸化炭素排出削減策導入効果の評価」（代表：花木啓祐教授・東京大学大学院）の支援により行われた．

参考文献

1) H. Yamamoto, J. Fujino and K. Yamaji：Evaluation of bioenergy potential with a multi-regional global-land-use-and-energy model, Biomass and Bioenergy, Vol. 21, No. 3, pp. 185-203, 2001.
2) International Institute for Applied System Analysis (IIASA)：GGI Scenario Database, http://www.iiasa.ac.at/Research/GGI/DB/, 2007.
3) E. Minami and S. Saka：Biomass resources present in Japan－annual quantities grown, unused and wasted, Biomass and Bioenergy, Vol. 29, No. 5, pp. 310-320, 2005.
4) 井内正直：バイオマスエネルギー利用計画支援システムの開発―賦存量データベース及び収集コスト評価モデル，電力中央研究所報告，研究報告Y03023, 2004.
5) H. Yamamoto, Y. Matsumura and S. Sawayama：Evaluation of supply potential of energy crops in Japan considering cases of improvement of crop productivity, Biomass and Bioenergy, Vol. 29, No. 5, pp. 355-359, 2005.
6) Andy Aden *et al.*：Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover, Biotecnology Center for Fuels and Chemicals, NREL, 2002.
7) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：バイオマスエネルギー高効率転換技術開発/セルロース系バイオマスを原料とする新規なエタノール醗酵技術等により燃料用エタノールを製造する技術の開発，平成16年度成果報告書，2006.
8) Alexander E. Farrell *et al.*：Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals, Science, Vol. 311, pp. 506-508, 2006.
9) David Pimentel and Tad W. Patzek：Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower, Natural Resources Research, Vol. 14, No. 1, 2005.
10)環境省生物多様性センター：自然環境保全基礎調査第5回植生調査3次メッシュ植生データ，2001.
11)農林水産省農林水産技術会議事務局：バイオマス変換計画，1991.
12)国土交通省国土計画局：国土数値情報土地利用メッシュ，1997.
13)国土交通省国土計画局：農業センサスメッシュ，1980.
14)気象業務支援センター：メッシュ気候値2000年，日最高気温・日最低気温・年間降水量.
15)国土交通省国土計画局：国土数値情報標高・傾斜度メッシュ，最大傾斜度.
16)FAO：Ecocrop 1, The crop environmental requirements database；Ecocrop2, The crop environmental response database, 2004.
17)農林水産省統計部：作物統計（普通作物・飼料作物・工芸農作物）.
18)国土調査研究会：土地・水情報の基礎と応用，1992.
19)日本エネルギー学会：バイオマスハンドブック，2005.
20)家畜改良センター長野牧場：長野牧場データ2006（未発表），2006.
21)D. L. Klass：Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals, 1998.
22)N. El Bassam：Energy Plant Species, 1998.
23)資源エネルギー庁：平成15年度総合エネルギー統計，2006.

24)独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：バイオマスエネルギー高効率転換技術開発/セルロース系バイオマスを原料とする新規なエタノール醗酵技術等により燃料用エタノールを製造する技術の開発, 平成 15 年度成果報告書, 2004.
25)農林水産省統計部：平成 13 年度 育林費結果報告, 2004.
26)農林水産省統計部：平成 13 年度 素材生産費等調査報告書, 2002.
27)農林水産省統計部：平成 13 年度 畜産物生産費, 2002.
28)農林水産省統計部：平成 13 年度 工芸農作物等の生産費, 2003.
29)南斉規介, 森口祐一：2000 年産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）, 国立環境研究所地球環境研究センター, 2006.
30)国土交通省総合政策局情報管理部：平成 18 年版 交通関係エネルギー要覧, 2006
31)Martin C. Heller *et al.*：Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system, Biomass and Bioenergy, Vol. 25, pp. 147-165, 2003.
32)Harro von Blottnitz *et al.*：A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspetive, Journal of Cleaner Production, Vol. 15, pp. 607-619, 2007.
33)石油産業活性化センター（PEC）：石油産業活性化センター平成 13 年度報告書, 2002.
34)石油連盟：2005 年度都道府県別販売実績.
35)環境省：環境統計集, 国内各温室効果ガスの排出量の推移, http://www.env.go.jp/doc/toukei/contents/index.html

ESTIMATION OF CO_2 REDUCTION POTENTIAL BY BIO-ETHANOL FROM PLANTATION-BIOMASS IN JAPAN

Chihiro KAYO, Keisuke HANAKI, Toshiya ARAMAKI, Satoshi ISHII

In this study, production potential of the plantation-biomass such as energy-tree and energy-crop was estimated for forests and grasslands in each prefecture of Japan. CO_2 reduction potential by bio-ethanol, which is an attractive alternative fuel to gasoline, from plantation-biomass was also calculated. The estimated biomass plantation areas were forests (89%) and grasslands (11%) which are approximately equivalent to 40% of the total land area in Japan. In addition, the annual production potential of the plantation-biomass was estimated to be nearly 4300 PJ, which is equivalent to 19% of the annual primary energy supply in Japan. 78% of the annual gasoline consumption could be replaced by bio-ethanol and then CO_2 emissions of 101 Mton, which are equivalent to 10% of domestic CO_2 emissions in 1990, could possibly be reduced in a year if all the plantation-biomass is converted bio-ethanol.