

S-3 脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案  
手法の確立に関する総合研究プロジェクト

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

(6) 都市系バイオマスと未利用エネルギーの活用によるエネルギー削減効果

東京大学

大学院工学系研究科都市工学専攻 荒巻 俊也

〈研究協力者〉 東京大学

大学院工学系研究科都市工学専攻

石井 暁

先端科学技術研究センター

栗栖(長谷川) 聖

[要旨] 建設発生木材、エネルギー作物や早生樹によるバイオエタノール製造ポテンシャル、下水熱利用の地域冷暖房システムによるCO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャルの推定を行った。具体的には、建設発生木材や栽培系バイオマスによるバイオエタノール製造ポテンシャルについては全国レベルでの推計を行い、特に建設発生木材については超長期シナリオにもとづく2050年までのポテンシャルの推定を行った。CO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャルとしては栽培系バイオマスは建設発生木材よりバイオエタノール生産のポテンシャルは大きくなった。また、下水熱利用地域冷暖房のポテンシャルについては、都区部全体では320の地区に導入することにより約137 [千tonCO<sub>2</sub>/yr]の削減ポテンシャルがあることが分かった。これは、東京都区部の民生部門のCO<sub>2</sub>排出量の推定値の0.54%であった。

[キーワード] バイオマス、建設発生木材、バイオエタノール、下水熱、地域冷暖房

1. はじめに

将来の脱温暖化社会におけるエネルギー源として、バイオマス資源の利用が期待されている。バイオマス資源には、厨芥や下水汚泥などの都市廃棄物系バイオマス、建設廃棄物や製材所廃棄物に含まれる木質バイオマス、エネルギー作物や早成樹などの栽培系バイオマスなどがあるが、それぞれに嫌気性発酵によるバイオガス生産、発酵などによる液体燃料化、焼却などによる発電・熱回収などの技術オプションが考えられる。さまざまな技術オプションの導入によりどの程度温室効果ガスの削減に貢献できるのか、それが将来の社会経済状態の変化に伴いどのように変わらうかについて統合的な解析が必要となっている。

また、都市の未利用熱の有効利用も温室効果ガス削減にむけた有効な対策と考えられている。清掃工場や変電所、地下鉄などの排熱、下水や河川水の熱エネルギーの利用などが未利用熱として考えられているが、どの程度の利用可能性があるかを正確に検討するためには、発生地点(供給)と需要の空間的な関係が特に熱利用を行う際には重要となる。

前年度までに、本研究グループでは都市廃棄物系バイオマスのメタンガス化についてそのポテンシャルと温室効果ガス削減効果を横浜市を対象として詳細に解析するとともに、東京都区部を対象として下水流下と地域冷暖房プラントの運用モデルを構築してきている。

## 2. 研究目的

本年度は、バイオマス利用の技術オプションの一つとしてバイオエタノールに注目し、全国レベルで建設発生木材や栽培系バイオマスによるバイオエタノール製造ポテンシャルの推定を行った。また、下水熱を用いた地域冷暖房システムの導入効果の解析をこれまでに構築してきたモデルを用いて東京都区部を対象として行った。

## 3. 研究方法

### (1) 建設発生木材からのバイオエタノール製造ポテンシャルの将来推定

バイオエタノール製造ポテンシャルの推計手法の概要を図1に示す。

2050年までの都道府県ごとの住宅延床面積のストックは本プロジェクトチームの試算値<sup>1)</sup>を用いた。住宅延床面積ストックなどのデータから新築・解体床面積を建て方別、構造別に推定し、住宅構造別の木材使用量原単位<sup>2)</sup>から新築時・解体時の廃木材発生量原単位を求め、建設発生木材量を推定した。

バイオエタノール製造プロセスの普及については、2008年から順次製造が行われ、10年間で100%の発生木材が利用されるようになるという仮定をおき、バイオエタノールへの転換効率（発生木材1tあたり290L）<sup>3)</sup>を用いて製造ポテンシャルを推定した。

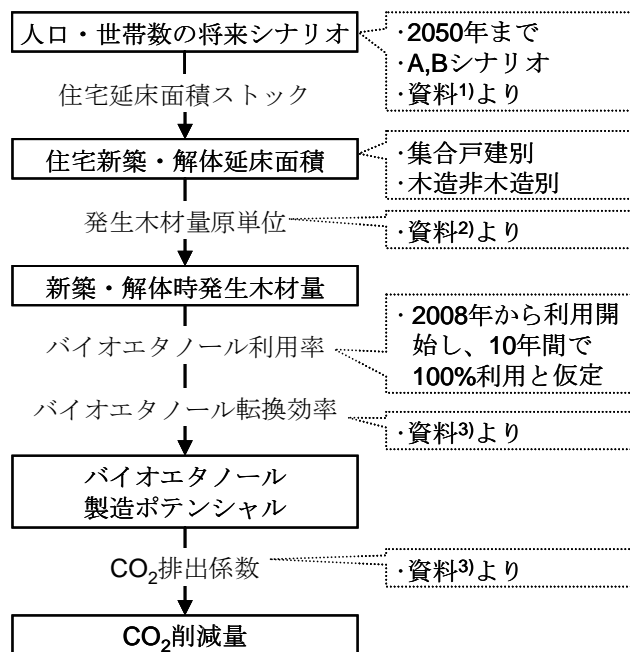


図1 建設発生木材からのバイオエタノール製造ポテンシャルの推定フロー

さらに、バイオエタノール製造システムのエネルギー収支（廃木材の収集プロセスも含む）から算出されたCO<sub>2</sub>排出係数(0.02 kg-CO<sub>2</sub>/L(=0.0009kg-CO<sub>2</sub>/MJ))<sup>3)</sup>と、ガソリン製造プロセスのCO<sub>2</sub>排出係数(2.71kg-CO<sub>2</sub>/L(=0.0784kg-CO<sub>2</sub>/MJ))<sup>4)</sup>からガソリン代替で利用した場合のCO<sub>2</sub>削減量を推定した。

## (2) 栽培系バイオマスからのバイオエタノール製造ポテンシャルの推定

### 1) 栽培対象地と対象バイオマス

日本の土地利用は、大きく森林(自然林地、二次林地、植林地)、草原(自然草原、二次草原、人工草原)、農耕地、住宅市街地に分類される。本研究におけるバイオマス栽培対象地は、かつて人為的管理が行われていたが現在はほとんど放置されている二次林地および植林地、また、かつて農耕地として利用されていたが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。これらの土地面積の合計は、国土面積の55%(二次林地25%、植林地25%、二次草原2%、人工草原3%)を占めている。

二次林地および植林地におけるバイオマス栽培対象樹種の選定において、かつて建築用材として育林されたスギ、ヒノキ、マツ等の従来樹種からエネルギー活用を主目的とした初期成長の早い早生樹への樹種転換の可能性を検討した。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やや早生な従来樹種として、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、二次草原および人工草原におけるバイオマス栽培対象作物種は、デンプン系バイオマスとしてコメおよびコムギ、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青刈コーンおよび青刈ソルゴーといった牧草を選定した。

### 2) 栽培系バイオマス都道府県別生産ポテンシャル推定手法と使用したデータベース

図2は栽培系バイオマス生産ポテンシャル推定手法である。全国都道府県別の土地利用状況を把握可能な3次メッシュ(約1km<sup>2</sup>)データとして「自然環境保全基礎調査植生調査3次メッシュ<sup>5)</sup>」を用いた。森林においては都道府県別に二次林地および植林地メッシュエリアを抽出し、後述する樹種別傾斜条件・気候条件によって早生樹種の生育可能地メッシュを解析し、都道府県別樹種別のバイオマス栽培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)に後述する樹種別年間生長量(t-dry/ha/year)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を高位発熱量換算MJ/year)を推定した。草原においても同様で、都道府県別に二次草原および人工草原メッシュエリアを抽出後、後述する作物種別LCCO<sub>2</sub>評価、気候条件から都道府県別作物種別のバイオマス栽培地メッシュを抽出した。抽出メッシュエリアの面積に後述する作物種別の年間生長量を乗じて、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を推計した。

急傾斜地の多い日本の森林において、早生樹の短周期栽培収穫を想定する際、対象地の傾斜度に応じて樹種ごとの栽培収穫システムを検討した。二次林地および植林地3次メッシュデータに対応した傾斜度3次メッシュデータ(「国土数値情報：最大傾斜度メッシュ<sup>6)</sup>」)を利用して、二次林地および植林地を緩傾斜地(農業的利用に適した0~15°の傾斜地<sup>7)</sup>)、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15~30°の傾斜地<sup>7)</sup>)、急傾斜地(林業的利用にも適さない30°以上の傾斜地<sup>7)</sup>)に3区分した。

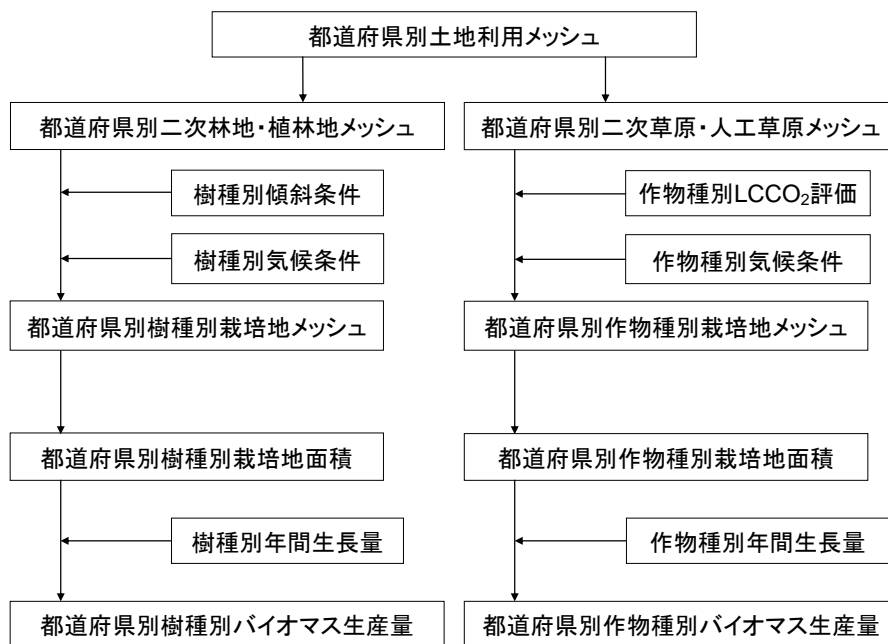


図2 栽培系バイオマス生産ポテンシャル推定フロー

対象樹種の中で、早生樹であるヤナギ(亜寒帯・温帯)およびアカシア(亜熱帯・熱帯)は、緩傾斜地における短周期(4年周期<sup>8)</sup>)での農業的栽培収穫システムを想定し、やや早生な従来樹種であるカンバ(亜寒帯・温帯)およびコジイ(暖温帯・亜熱帯)は、中傾斜地における中周期(10年周期<sup>12)</sup>)での林業的栽培収穫システムを想定した(表1)。また、上記4樹種が生育不可能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(表1)。なお、15~30°程度の中傾斜地において、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も重要である。また、林業的利用にも不適と判断される30°以上の急傾斜地については、バイオマス栽培対象地から除外することとした。

対象樹種が生育可能な気候条件については、「自然環境保全基礎調査植生調査3次メッシュ」の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<sup>9)</sup>」)を解析し、各樹種が生育可能な気候値(日最高気温・日最低気温・年間降水量)範囲を決定した(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<sup>10)</sup>)の報告値から気候値範囲を決定した(表1)。

後述する栽培系バイオマスLCCO<sub>2</sub>評価の結果を用いて、コメ、コムギ、青刈コーン、青刈ソルゴー、サトウキビのエネルギー利用におけるLCCO<sub>2</sub>排出量が小さい順に、(1)サトウキビ、(2)青刈ソルゴー、(3)青刈コーンの3種を二次草原および人工草原における栽培系バイオマスの対象作物種とした。

表1 各種栽培系バイオマスの傾斜条件・気候条件・年間生長量

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

	作物栽培地	年間生長量
	(都道府県)	(t-dry/ha/year)
サトウキビ	鹿児島県・沖縄県	50
青刈コーン	北海道	19
青刈ソルゴー	上記以外の都府県	18

農林水産省の統計資料<sup>11)</sup>によると、サトウキビは亜熱帯気候の鹿児島県および沖縄県のみ生産されており、青刈ソルゴーは北海道以外の全都府県で生産され、青刈コーンは亜寒帯気候の北海道を含む全都道府県で生産されている。そこで、二次草原および人工草原での作物栽培において、鹿児島県および沖縄県はサトウキビ栽培、北海道は青刈コーン栽培、その他の都府県は青刈ソルゴー栽培を想定することとした(表1)。

ヤナギ、アカシア、カンバ、コジイおよびササの年間生長量は、農林水産省「バイオマス変換計画<sup>8)</sup>」において報告された国内の林業試験場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<sup>12)</sup>を、青刈コーンおよび青刈ソルゴーは、国内の農業試験場における実測値<sup>13)</sup>を用いた(表1)。

### (3) 下水熱利用地域冷暖房システムの導入効果の評価方法

下水熱は地域冷暖房(DHC)の熱源として活用することで利用可能になるが、質の低い熱である反面、都心部に張り巡らされている下水のネットワークから熱を取り出せるという優位性を有している。しかしながら、現実の都市における下水熱の利用による温室効果削減可能量については、定量的な評価がなされておらず、そのポテンシャルすら明らかになっていない。そこで、DHCプラントシミュレーションモデルと、下水流量と温度を計算する下水幹線シミュレーションモデルの2つのモデルを開発し、東京都区部の建物情報を利用して同地域に適用し、東京都区部において下水熱を最も効率よく利用した場合にどの程度CO<sub>2</sub>が削減されるかについて推定した。

図3は下水幹線シミュレーションモデルの概要を示している。東京都の建物利用の地理情報システムと下水温度の実測値を元に任意の地点の下水流量と水温を推定する手法を新たに開発した。この方法では、建物の用途別の床面積あたり下水排出原単位に、各建物用途ごとの床面積を乗じ、また下水の流下時間をも考慮した。下水の集水域を各幹線の流域図を基に独自に決定した点や、下水の流下に伴うタイムラグを考慮した点、上流側のDHCで下水熱を利用した場合に下流側の下水温度を変化させた点にオリジナリティがある。

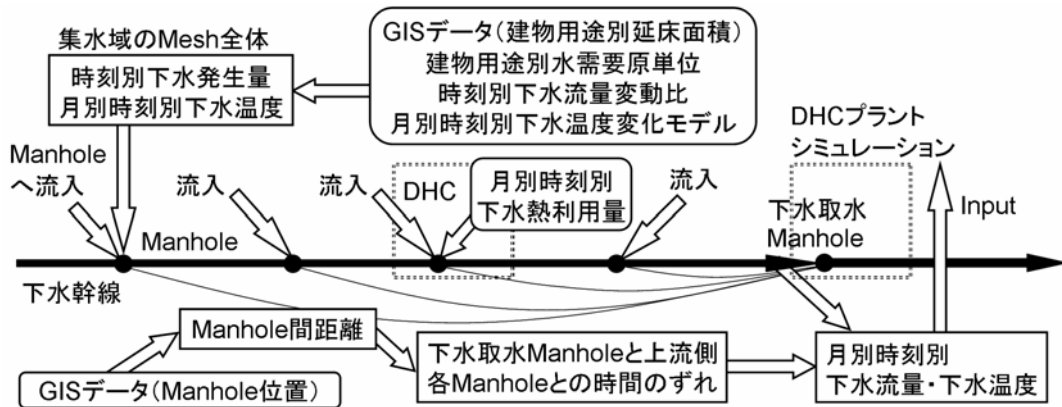


図3 下水幹線シミュレーションモデルの概要

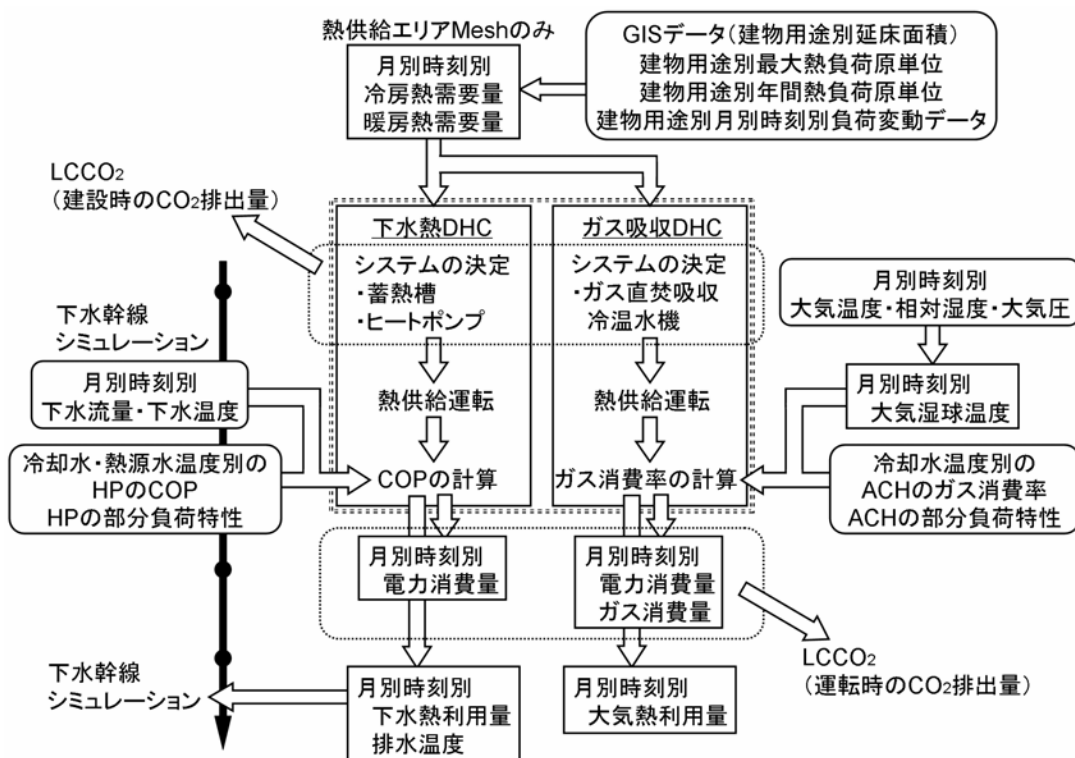


図4 DHCプラントシミュレーションモデルの概要

図4はDHCプラントのシミュレーションモデルの概要を示している。このモデルでは、1年間を通じて、1ヶ月ごとおよび1時間ごとのシミュレーションが可能になっており、また現実の状態に合わせて蓄熱槽の設置も考慮している。二酸化炭素排出量を計算する場合には時刻によって電力の炭素原単位が異なるため、このような詳細な検討が必要になり、その意味でこのような緻密なモデル設定は重要である。

これら二つのモデルを用いて、対象メッシュにDHCを導入した場合の確保できる熱量、LCCO<sub>2</sub>や経済性を推定した。2つのモデルや評価方法の詳細は池上<sup>14)</sup>を参照されたい。

#### 4. 結果・考察

##### (1) 建設発生木材によるバイオエタノール製造ポテンシャル

1) 住宅ストックの変化と建設発生木材量

戸建て、集合住宅の住宅ストック床面積の全国集計値の将来変化をシナリオごとに図5に示す。また、ストック床面積から推定された新築・解体床面積もこの図に併せて示す。シナリオAではより人口が減少するため、シナリオBより住宅ストック、とりわけ戸建ての住宅ストックが数%のオーダーで少なくなることが予想される。新築・解体床面積についても同様に数%程度の差となる。なお、これらの床面積から計算される建設発生木材量は、2004年に12.0百万tであるのに対し、2050年ではシナリオAで10.2百万t、シナリオBで10.9百万tとなる。

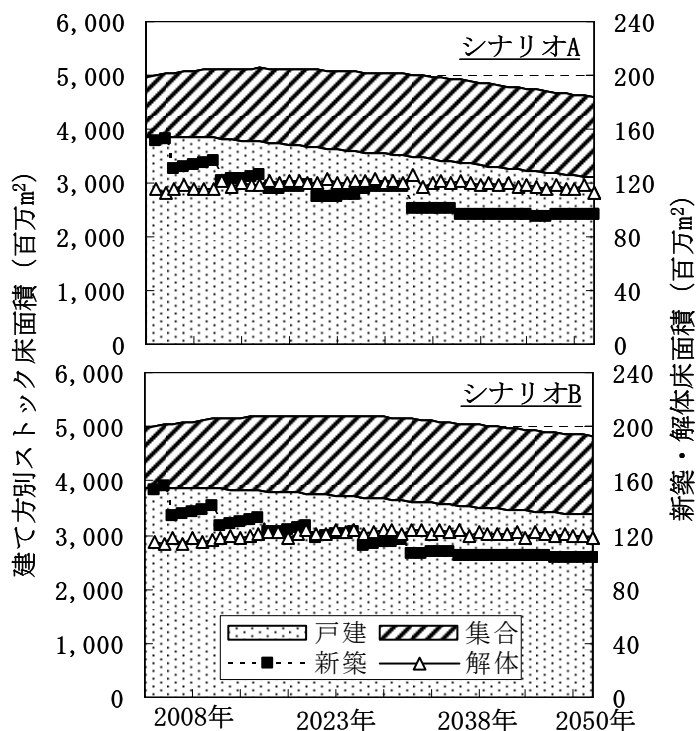


図5 建て方別住宅ストックの変動と新築・解体床面積

2) エタノール製造ポテンシャルとCO<sub>2</sub>削減量

2050年の日本全国でのバイオエタノール製造ポテンシャルの変化を図6に示す。2050年時点でシナリオAで3.0百万kL(62.8PJ)、シナリオBで3.1百万kL(66.7PJ)であり、発熱量換算で2002年時点のガソリン消費量58.4百万kL(2020.6PJ)の約3%に相当する。つまり、2050年に全てのガソリンがE3と代替可能となるようなエタノールを供給できることになる。

バイオエタノールによるガソリン代替に伴うCO<sub>2</sub>削減量を試算すると図7のようになる。2050年ではシナリオAで4.9百万t、シナリオBで5.2百万tとなっており、2000年の全国排出量1,190百万tの約0.4%に相当する。

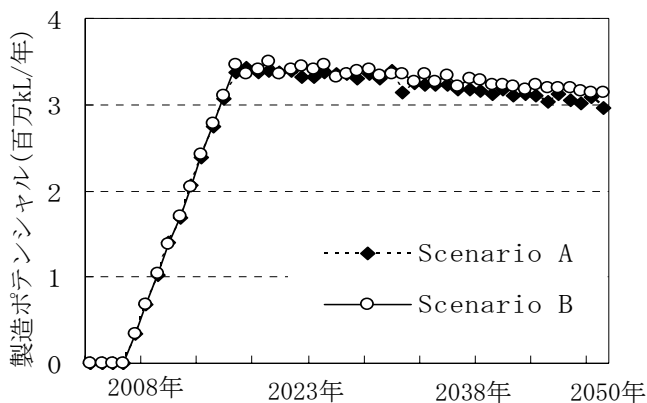


図6 バイオエタノール製造ポテンシャルの変化

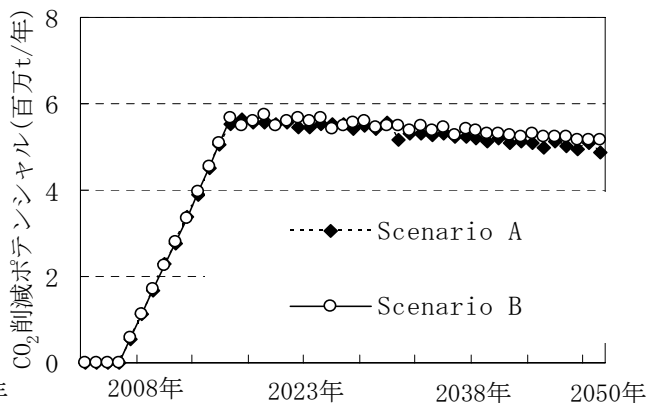


図7 CO<sub>2</sub>削減ポテンシャルの変化

(2) 栽培系バイオマスによるバイオエタノール製造ポテンシャル

1) 栽培系バイオマス都道府県別生産ポテンシャル推定結果

図8は、都道府県別の二次林地、植林地、二次草原、人工草原の合計面積と、これらの中で実際にバイオマス栽培対象地となる土地面積の推定結果を示している。これは、30°以上の急傾斜地あるいは対象バイオマスの生育不適地と判断される気候地域を除外した土地面積を示している。北海道、宮城県、茨城県、千葉県、佐賀県、沖縄県は二次林地、植林地、二次草原、人工草原合計面積の90%以上がバイオマス栽培対象地となるのに対し、福井県、山梨県、奈良県、和歌山県、徳島県、高知県は二次林地・植林地・二次草原・人工草原合計面積の30%~50%程度を利用することになる。日本全体では、二次林地、植林地、二次草原、人工草原合計面積の72%の土地面積においてバイオマス栽培が可能と推定された。

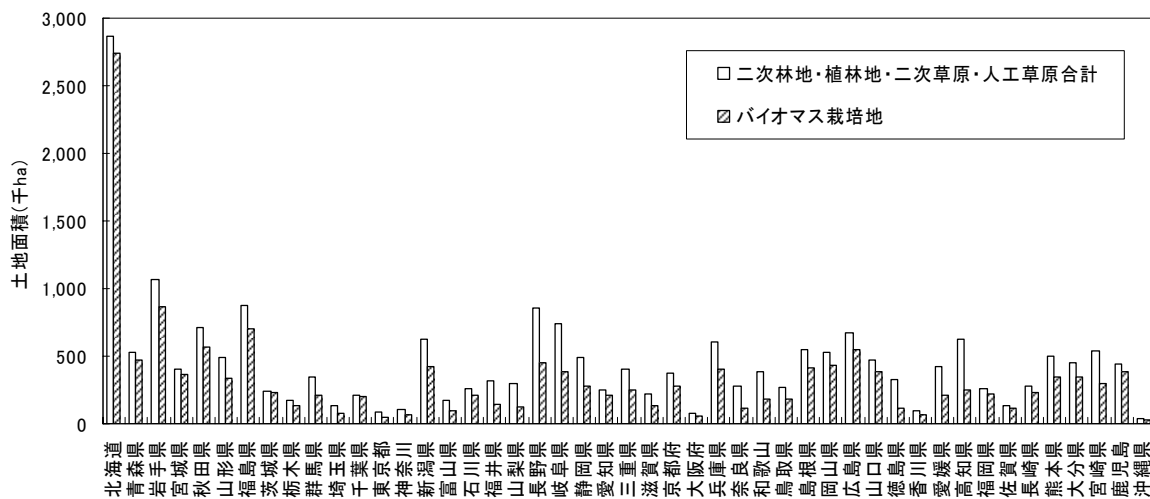


図8 都道府県別バイオマス栽培対象地面積

図9は、これら都道府県別バイオマス栽培対象地の中で、二次林地および植林地における樹種別栽培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。

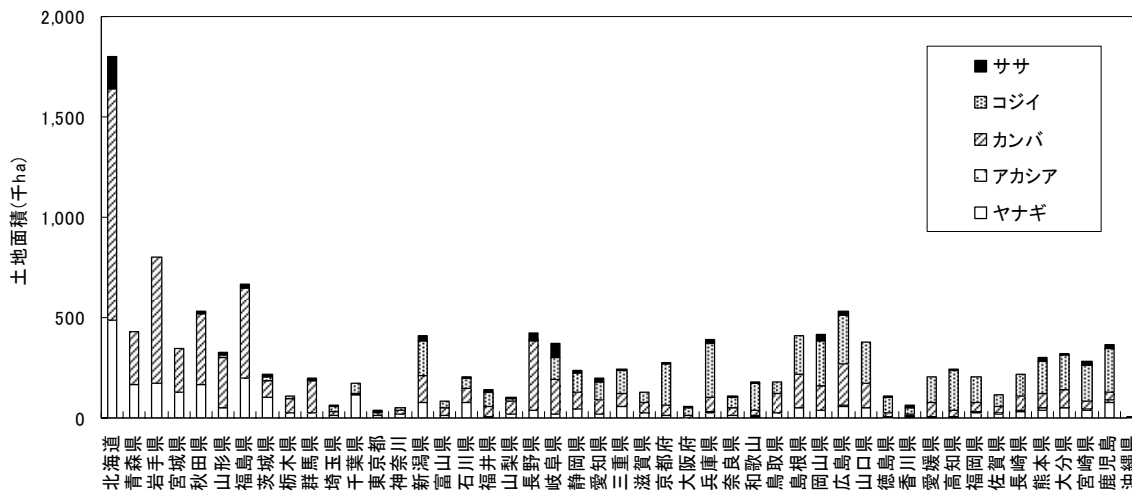


図9 都道府県別樹種別栽培対象面積

また図10は、樹種別および作物種別バイオマス栽培対象面積(ha)に各樹種および作物の年間生長量(t-dry/ha/year)を乗じることにより、栽培系バイオマスの都道府県別年間生産ポテンシャル(t-dry/yearを高位発熱量換算 MJ/year<sup>15)</sup>を推定した結果を示している。日本全体での栽培系バイオマス生産ポテンシャルは年間約4300PJ(森林87%、草原13%)と推定され、日本の年間一次エネルギー総供給量<sup>16)</sup>の19%に相当している。この中で、北海道の生産ポテンシャルは日本全体の約20%を占めていた。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、各都府県のポテンシャルは日本全体の1%に満たない結果となった。

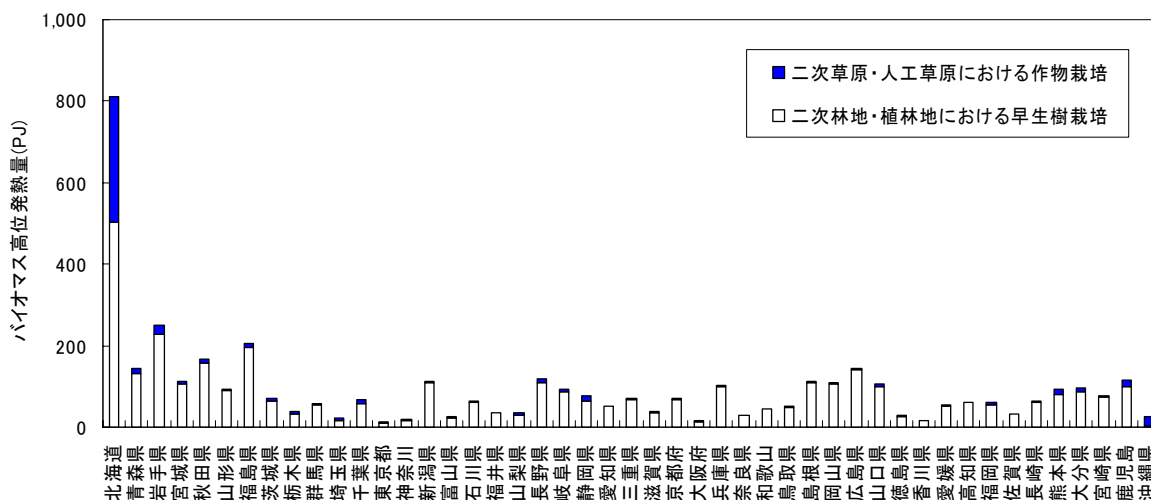


図10 栽培系バイオマス都道府県別生産ポテンシャル推定結果

## 2) バイオエタノールの LCCO<sub>2</sub> 評価

主な組成成分の違いから、糖系のサトウキビ、デンプン系のコメおよびコムギ、セルロース系の樹木(ヤナギ、アカシア、カンバ、コジイ、ササ)および牧草(青刈コーン、青刈ソルゴー)を対象バイオマスとして解析を行った。

表 2 はバイオエタノールの LCCO<sub>2</sub> 評価のシステム境界および評価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。表に示すように、バイオマス栽培収穫過程は、農業機械および林業機械を使用する際の燃料エネルギー消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出、そして、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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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需要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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 排出を対象とした。また、バイオエタノール製造過程は、各エタノール製造工程(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<sub>2</sub> 排出、エタノール製造に必要な薬品を生産する際のエネルギー消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出を評価対象とした。

表 2 バイオエタノールの LCCO<sub>2</sub> 評価のシステム境界・評価対象

システム境界	評価対象
バイオマス栽培収穫過程	農業機械・林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需要地まで)
	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

農林水産省の統計資料に報告されている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、燃料種別の発熱量原単位(MJ/L)<sup>16)</sup>およびCO<sub>2</sub>排出量原単位(t-CO<sub>2</sub>/MJ)<sup>16)</sup>を乗じて、機械使用時の燃料エネルギー消費に伴うCO<sub>2</sub>排出量(t-CO<sub>2</sub>/ha/year)を算定した。なお、統計資料は、ヤナギ、アカシア、カンバ、コジイ、ササの栽培時においては「育林費結果報告<sup>17)</sup>」を、収穫時においては「素材生産費等調査報告<sup>18)</sup>」を引用した。また、コメおよびコムギの栽培収穫時においては「米及び麦類の生産費<sup>19)</sup>」、青刈コーンおよび青刈ソルゴーの栽培収穫時においては「畜産物生産費<sup>20)</sup>」、サトウキビの栽培収穫時においては「工芸農作物の生産費<sup>21)</sup>」を用いた。また、これと同様の統計資料に報告されている農業機械(作物)および林業機械(樹木)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<sub>2</sub>排出量原単位(t-CO<sub>2</sub>/円)<sup>22)</sup>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<sub>2</sub>排出量(t-CO<sub>2</sub>/ha/year)を算出した。

バイオマス栽培地からバイオエタノールの主な需要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 10km と仮定し、往復 20km 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(年間生長量) (t-dry/ha/year) に、貨物自動車エネルギー消費量原単位 (MJ/t/km)<sup>23)</sup>、軽油の CO<sub>2</sub> 排出原単位 (t-CO<sub>2</sub>/MJ)<sup>16)</sup>、往復輸送距離 20km 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<sub>2</sub> 排出量 (t-CO<sub>2</sub>/ha/year) を算出した。また、各種バイオマス往復 20km 輸送時の軽油消費量 (MJ/ha/year) に、産業連関表 (I-A)-1 型 CO<sub>2</sub> 排出量原単位 (石油製品部門) (t-CO<sub>2</sub>/MJ に換算)<sup>22)</sup> を乗じて、燃料生産時のエネルギー消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出量 (t-CO<sub>2</sub>/ha/year) を算出した。

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。このため、対象バイオマスを糖系のサトウキビ、デンプン系のコメおよびコムギ、セルロース系の樹木(ヤナギ、アカシア、カンバ、コジイ、ササ)および牧草(青刈コーン、青刈ソルゴー)に 3 分類し、これら 3 種類のバイオエタノール製造プロセスを想定した。NEDO の報告書<sup>3)</sup>を参考に、3 種類の製造プロセスにおける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<sub>2</sub> 排出量を算定した。セルロース系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<sub>2</sub> 排出量は、Maruyama<sup>24)</sup>の報告値を引用し、デンプン系および糖系バイオエタノールは、該当する製造プロセスのみの電力・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<sub>2</sub> 排出量を対象とした。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、糖系のサトウキビからはバガスが醗酵残渣として発生する。これらの醗酵残渣は、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。なお、デンプン系のコメおよびコムギにおいては、リグニンやバガスに相当する醗酵残渣が発生しないため、エネルギー回収は想定しない。

図 11 は、醗酵残渣による熱エネルギー回収を考慮した場合の各種バイオマスにおけるバイオエタノール生産量 1GJ 当たりの LCCO<sub>2</sub> 排出量評価結果を示している。また、バイオエタノールの代替対象となるガソリンについても、文献値<sup>28)</sup>を引用したガソリン生産量 1GJ 当たりの LCCO<sub>2</sub> 排出量を示した(図 12)。バイオマスの主な組成成分によって LCCO<sub>2</sub> 排出量を比較すると、糖系のサトウキビの CO<sub>2</sub> 排出量 (11kg-CO<sub>2</sub>/GJ) が最も小さく、次いでセルロース系の青刈ソルゴー (18kg-CO<sub>2</sub>/GJ)、青刈コーン (18kg-CO<sub>2</sub>/GJ) および樹木となり、デンプン系のコメ (33kg-CO<sub>2</sub>/GJ) およびコムギ (32kg-CO<sub>2</sub>/GJ) は、CO<sub>2</sub> 排出量が大きくなる結果となった。これは、バイオエタノール製造過程において、サトウキビはバガスを、牧草や樹木は醗酵残渣であるリグニンを熱エネルギーとしてエネルギー回収することが可能であり、エタノール製造時のエネルギー消費量を大幅に削減することができるためである。また、図 12 において、ガソリンの LCCO<sub>2</sub> 排出量 (78kg-CO<sub>2</sub>/GJ) は、ガソリンの燃焼時における CO<sub>2</sub> 排出量が LCCO<sub>2</sub> 全体の 86% を占めていた。カーボンニュートラルという概念から、バイオエタノールの燃焼は CO<sub>2</sub> 排出と見なされないのに対し、化石燃料由来のガソリンの燃焼は CO<sub>2</sub> 排出源となる。このため、全てのバイオマス種において、ガソリンと比較した場合の LC CO<sub>2</sub> 排出量は小さく、ガソリンをバイオエタノールで代替することは、代替量 1MJ 当たりサトウキビの最大 67kg-CO<sub>2</sub>/GJ (=78-11) からコメの最小 45kg-CO<sub>2</sub>/GJ (=78-33) までの CO<sub>2</sub> 排出削減効果があることが分かった。

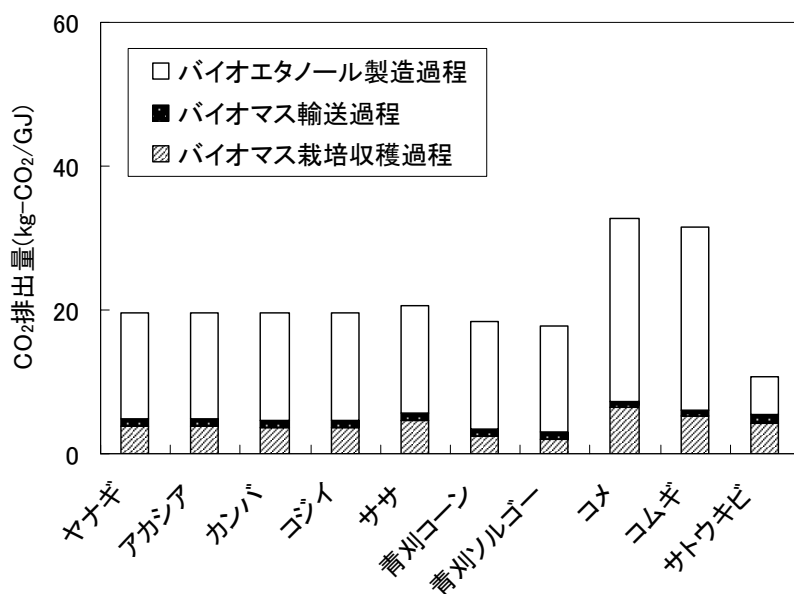


図 11 バイオエタノールの LCCO<sub>2</sub> 評価結果

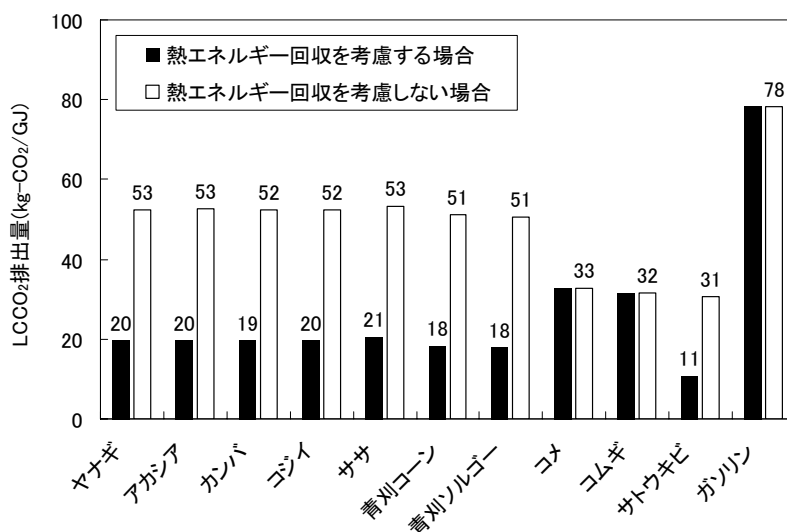


図 12 バイオエタノールとガソリンの LCCO<sub>2</sub> 比較

### 3) 栽培系バイオマスのバイオエタノール活用による CO<sub>2</sub> 排出削減ポテンシャル評価

図 13 は、日本全体を 8 地域に分割して地域ごとのバイオエタノールおよびガソリンの需給バランスを評価した結果を示している。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可能であることが分かった。

バイオエタノールの LCCO<sub>2</sub> 評価結果を用いて、栽培系バイオマスからのバイオエタノール供給可能量全量をガソリンと代替した場合の LCCO<sub>2</sub> 排出削減ポテンシャルを算定した結果、約

138Mt-CO<sub>2</sub> の排出削減効果があることが分かった。これは、日本全体の年間 CO<sub>2</sub> 排出量 1,188Mt-CO<sub>2</sub><sup>29)</sup> の約 12%に相当している。

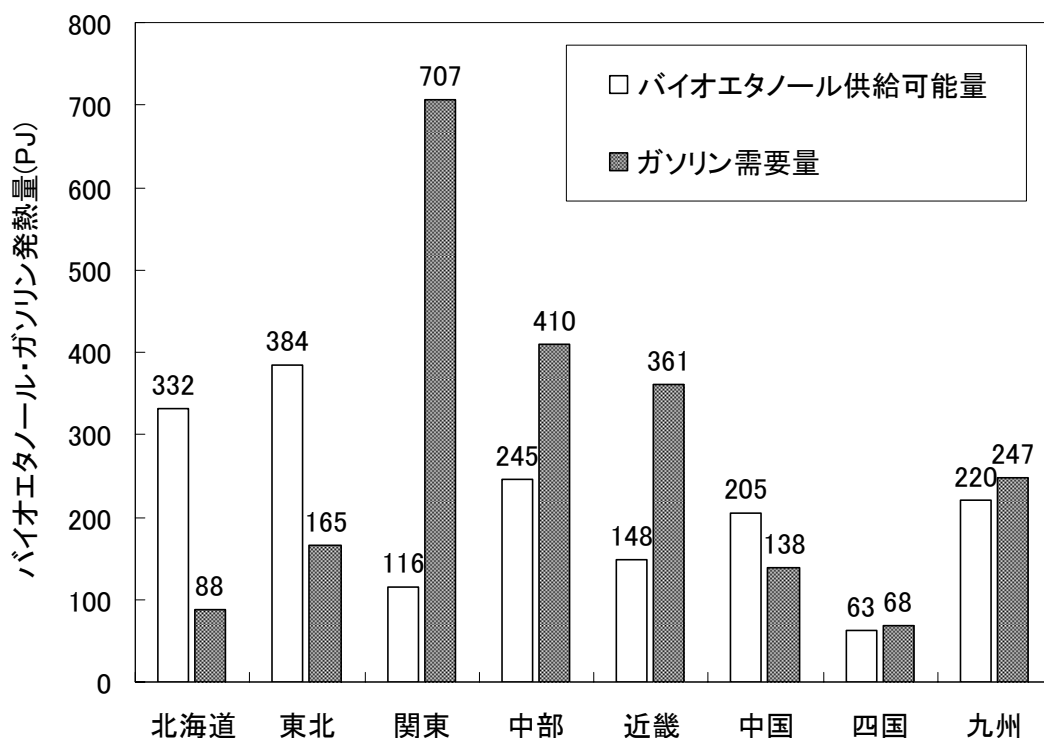


図 13 バイオエタノールとガソリンの 8 地方別需給バランス

### (3) 東京都区部における下水熱利用地域冷暖房によるCO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャル

表3は各処理区において下水熱を最も有効に利用した場合のCO<sub>2</sub>排出削減量と削減率を示している。もっとも熱需要が大きい芝浦処理区では59の地区に下水熱DHCを導入することによりこれらの地区に通常のDHCを導入した場合より年間49,913トンのCO<sub>2</sub>排出を削減できる。これは当該地区の民生部門CO<sub>2</sub>排出量推定値の約0.70%に相当し、この時のCO<sub>2</sub>排出削減コストは平均すると約9.5 [千円/tonCO<sub>2</sub>]であると試算された。都区部全体では320の地区に下水熱DHCを導入することにより約137 [千tonCO<sub>2</sub>/yr]のCO<sub>2</sub>を削減できるポテンシャルがあることが分かった。これは、東京都区部の民生部門のCO<sub>2</sub>排出量の推定値の0.54%であった。

また、熱需要の多い芝浦処理区を対象として、気候条件を変化させて導入効果がどのように変化するかを検討した。具体的には、気温や下水温度について札幌の情報を用いてシミュレーションを行った。その結果、下水熱DHCの導入は寒冷地の方がCO<sub>2</sub>削減コストやCO<sub>2</sub>削減率といった面で効果が大きくなるが、熱利用による冬季の下水温度の低下が問題となり多数のDHCの導入には困難があることが示された。

表3 各処理区のCO<sub>2</sub>排出削減量・削減率

下水処理区	導入DHC数	LCCO <sub>2</sub> 排出削減量 [tonCO <sub>2</sub> /yr]	民生部門のCO <sub>2</sub> 排出量に対する削減率	
			処理区全体	熱供給エリア比
芝浦	59	49,913	0.70%	10.83%
三河島	46	19,964	0.69%	10.36%
砂町	37	9,772	0.49%	8.87%
小台	10	3,111	0.42%	9.87%
落合	24	10,853	0.56%	11.69%
森ヶ崎	79	27,568	0.58%	10.30%
小菅	2	306	0.06%	8.82%
葛西	27	7,502	0.53%	9.89%
新河岸	31	7,261	0.24%	9.58%
中川	5	1,140	0.12%	11.63%
合計	320	137,389	0.54%	10.41%

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

栽培系バイオマスによるバイオエタノールの製造ポテンシャルについて、これまでのさまざまな推計とは異なり、地域の気候条件や傾斜などの条件を考慮しより現状に即したポテンシャルの評価が行えるようになった。今後、推定に用いられているパラメータの精度の向上やその他の利用用途との競合関係を考慮することにより、さらに現実に近い推計が行えるようになるものと考えている。

また下水熱の貯存量については、これまで利用可能温度を一律に仮定した形での評価しか行われていなかったが、本研究で開発したモデルでは下水温度による機器の効率の変化などまで考慮に入れており、初めて現実的な利用可能ポテンシャルの評価に成功したものと言える。

### (2) 地球環境政策への貢献

バイオマス利用の部分についての成果については、今後さまざまなバイオマスや技術オプションを追加していくことにより、地域ごとにどのようにバイオマス資源を活用していくかについてその戦略を検討していくための情報を与えるものとなる。下水熱利用の成果についても、都市ごとに下水熱利用のポテンシャルを検討していくための手法を提示しており、今後さまざまな自治体でポテンシャルを推定するうえで有用なものとなる。

## 6. 引用文献

- 1) 「2050日本低炭素社会」プロジェクトチーム：「2050日本低炭素社会シナリオ：温室効果ガス70%削減可能性検討」, [http://2050.nies.go.jp/interimreport/20070215\\_report.pdf](http://2050.nies.go.jp/interimreport/20070215_report.pdf), 2007
- 2) 国土交通省：「建設資材・労働力需要実態調査（建築部門）報告書 平成12年度実績」, 2002
- 3) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：「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発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13年度～平成17年度成果報告書」, 2006
- 4) 石油産業活性化センター：「平成13年度 輸送用燃料ライフサイクルインベントリーに関する調査報告書」, 2002

- 5) 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
- 6) 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」，1981
- 7) 国土調査研究会：「土地・水情報の基礎と応用」，1992
- 8) 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
- 9) 気象業務支援センター：「メッシュ気候値」，2000
- 10) FAO：”Ecocrop1:The crop environmental requirements database & Ecocrop2:The crop environmental response database”，2004
- 11) 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)」，
- 12) 日本エネルギー学会：「バイオマスハンドブック」，2005
- 13) 日本草地畜産種子協会：「飼料作物品種・種子情報」，
- 14) 池上貴志：「東京都区部における下水熱利用地域冷暖房システムの戦略的導入による二酸化炭素排出削減効果および経済性の解析」，平成18年度東京大学博士論文，2006
- 15) N. El Bassam, “Energy Plant Species”, Earthscan Pubns Ltd., 1998
- 16) 資源エネルギー庁：「総合エネルギー統計 平成15年度版」，2006
- 17) 農林水産省統計部：「平成13年度 育林費結果報告」，2004.
- 18) 農林水産省統計部：「平成13年度 素材生産費等調査報告書」，2004
- 19) 農林水産省統計部：「平成13年度 米及び麦類の生産費」，2004
- 20) 農林水産省統計部：「平成13年度 畜産物生産費」，2004
- 21) 農林水産省統計部：「平成13年度 工芸農作物の生産費」，2004
- 22) 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
- 23) 国土交通省総合政策局情報管理部：「交通関係エネルギー要覧 平成18年版」，2006
- 24) S. Maruyama, “Development of Pretreatment, Saccharification and Ethanol Fermentation Technique, New Ethanol Fermentation Technique and the Like from Cellulose Biomass”，2003

## 7. 国際共同研究等の状況

該当なし

## 8. 研究成果の発表状況

<論文(査読あり)>

なし

<査読付論文に準ずる成果発表>

なし

<その他誌上発表>

なし

### (2) 口頭発表(学会)

- 1) T. Aramaki, T. Sonoda, S. Ishii, K. Hasegawa-Kurusu and K. Hanaki, “Long-term estimation of utilization potential for unused biomass in a regional scale”, Annual Meeting 2007 of the Alliance for

Global Sustainability, Barcelona, 170, 2007.

- 2) 加用千裕、荒巻俊也、園田隼也、石井暁、花木啓祐:「住宅由来の建設発生木材によるバイオエタノール製造ポテンシャルの将来推定」, 土木学会平成19年度全国大会, 広島, 2007. (原稿提出済み)

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし