

# 廃棄物バイオマスの利用ポテンシャルの将来予測と 温室効果ガス排出削減効果の解析 ～都市湿系バイオマスと建設発生木材を対象として

荒巻 俊也\*・石井 暁・園田 隼也・加用 千裕・花木 啓祐

(東京大学大学院)

\* e-mail : aramaki@env.t.u-tokyo.ac.jp

## 摘 要

本研究では、比較的賦存量が多いと考えられている厨芥や下水汚泥といった都市湿系バイオマス、人びとの住まい方による影響が大きいと考えられる建設発生木材を対象として、都市湿系バイオマスについてはバイオガス生産、建設発生木材についてはバイオ燃料化を技術オプションとした場合の超長期的な供給ポテンシャルを日本の社会の将来像を表す2つのシナリオの下に推定した。さらに、これらの利用による温室効果ガス排出削減効果を推定した。その結果、2050年において、都市湿系バイオマスからのバイオガス生産については年間約1.8百万t、建設発生木材からのバイオエタノール製造については約5.0百万t程度の二酸化炭素排出削減がポテンシャルとして示された。それぞれのポテンシャルの算出において多くの仮定を用いているため、結果の解釈には十分な注意が必要であるが、異なる2つの社会像の下でのこれらのバイオマス利用ポテンシャルには大きな差はないことが示された。今後、さまざまなバイオマス資源について、さまざまな技術オプションを利用した場合の将来にわたる利用可能量とその効果や環境影響を推定していくことにより、ある地域においてどのバイオマスをどのように利用していくかについて、戦略的に検討するための材料を提供しうるものと考えている。

キーワード：建設発生木材、湿系バイオマス、住宅、将来予測、バイオエタノール、バイオガス

## 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。エネルギー源として利用可能なバイオマス資源には、厨芥、下水汚泥、紙系廃棄物、建設発生木材、林地残材、農業廃棄物などの廃棄物系のものと、エネルギー作物やバージン木材などの栽培系のものがあり、直接燃焼によるエネルギー回収、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などの技術オプションが考えられている。

これらのバイオマス資源の中でも、廃棄物として排出されるものは有効利用することにより温室効果ガスの削減だけでなく、廃棄物処理の負担軽減にもつながりうる。一方で、これらの廃棄物をマテリアルとして有効利用するという方策も考えられており、エネルギー利用することによって得られる効果を明確にしておく必要がある。

バイオマス資源の賦存量については、個別のバイオマスごとにはさまざまな検討がなされてい

る。日本全体としては、「バイオマスニッポン総合戦略<sup>1)</sup>」でさまざまな種類のバイオマスの賦存量の推定がなされている。バイオマスの種類を限っているものもあるが、海外でも同様の試みが行われている<sup>2)-4)</sup>。しかし、バイオマス資源、特に廃棄物系バイオマスの賦存量は、人口や経済活動、ライフスタイルなど、さまざまな自然的な状況、社会経済的な状況による影響を受け得る。また、賦存量だけでなく、採用されうる技術オプションも経済活動やライフスタイルなどの影響を受ける。よって、持続的なエネルギー源としてこれらのバイオマス資源を考える場合に、超長期にわたる社会経済状況の変化を想定しながら賦存量を検討しておく必要がある。

本研究では、厨芥や下水汚泥といった都市湿系バイオマスと建設発生木材を対象とする。いずれも、人びとの住まい方や社会経済的な状況の変動により利用可能量が変動するバイオマスであり、また、比較的賦存量が多いと考えられるものである。都市湿系バイオマスについてはバイオガス生産、建設発生木材についてはバイオ燃料化を行っ

た場合の超長期的な供給ポテンシャルを推定するとともに、これらの利用による温室効果ガス排出削減効果を推定する。選択可能な技術オプションとして、都市湿系バイオマスについてはガス化や炭化によるエネルギー生産が、建設発生木材については木材チップとしての固形燃料供給などが考えられ、これらはバイオガス生産やバイオ燃料化と競合することになる。本稿での解析では、それぞれの技術オプションのポテンシャルを推定することを目標としているので、これらの競合関係にある技術の存在は考慮しないこととする。なお、対象とした湿系バイオマスのバイオガス生産については、すでに今日までにも広く導入されており、技術的には成熟したものである。一方で、建設発生木材のバイオ燃料化は技術開発の途上にあるが、化石燃料の主要な消費源である自動車燃料の代替が可能であるという利点をもつ。本稿ではこれら2つの技術オプションのみを検討するが、将来的には、他のさまざまな技術オプションに対して同様の解析を行うことにより、技術間の競合関係も考慮した温室効果ガス排出削減効果の推定が可能になるものと考えている。

なお、超長期的な供給ポテンシャルを推定する上での人口や世帯数のデータとして、(独)国立環境研究所他による「脱温暖化 2050 研究プロジェクト」<sup>9)</sup>が作成した、2050 年にかけての人口・社会・経済に関する超長期シナリオを用いる。ここでは、2つの将来の社会像を表すシナリオ(以下、A シナリオと B シナリオ)を構築しており、A シナリオでは経済発展・技術志向型の社会を、B シナリオでは地域重視・自然志向型の社会と幅を持った将来像を想定している。これらのシナリオによる 2050 年における全国人口は、A シナリオで約 9.5 千万人、B シナリオは出生率が高くなると仮定されているため約 1 億人となり、A シナリオでは都市への人口集中と地方の過疎化がさらに進むという設定になっている。

## 2. 都市湿系バイオマスからのバイオガス製造ポテンシャルの解析

### 2.1 湿系バイオマスの賦存量の推定

湿系バイオマスのうち家庭から排出される厨芥については、各シナリオにおける将来人口の予測値を用いて推計した。排出原単位は、平成 16 年度、または 17 年度の家ごみの組成調査として事業概要やホームページで報告されている秋田市、仙台市、金沢市、相模原市、京都市、福岡市の平均値 224.8(± 22.1)g/日/人を用いた。なお、

将来人口の予測値は都道府県土地分類ごと(都市地域、平野農業地域、中山間地域)にあるため、地域ごとに推計した。

事業系の厨芥については、多く排出する業種として、一般およびその他飲食店、飲食料品およびその他小売店、宿泊業、学校、病院、福祉介護施設を選び、事業所企業統計における中分類別従業員数と夜間人口、昼間人口、高齢人口(65 歳以上)との間で相関解析を行い、最も関連のある項目を抽出した。その結果、一般およびその他飲食店、宿泊業や学校については昼間人口との相関が、飲食料品およびその他小売店については夜間人口との相関が、病院、福祉介護施設については高齢人口との相関が高いことがわかった。これより、羽原ら<sup>6)</sup>の方法により、都道府県土地分類ごとに厨芥発生量を予測した。なお、昼間人口については、A シナリオにおいては昼夜間人口移動人数を 2000 年レベルで固定した。一方で、地域重視・自然志向型の B シナリオにおいて在宅勤務および職住近接が進むものと考え、昼間人口と夜間人口の比率が 2050 年にかけて 1 に収束すると仮定した。

汚水処理から排出される汚泥量の算出にあたっては、平成 15 年度の下水道統計<sup>7)</sup>より一人あたりの汚泥量と有機成分を求め、また将来的な汚水処理率の推移を 2000 年～2005 年における実績データおよび各都道府県下水道構想における目標値から回帰直線を求めて、図 1 のように推定した。汚水処理の普及は各都道府県とも、都市地域、平野農業地域、中山間地域の順で進むものとして、これらの情報から土地類型別に発生汚泥量を算出した。

### 2.2 バイオガス生産への利用可能量の算出

将来の社会のあり方により、バイオガス製造に利用可能な湿系バイオマス量は変化しうる。具体的には、技術志向型の A シナリオでは湿系バイ

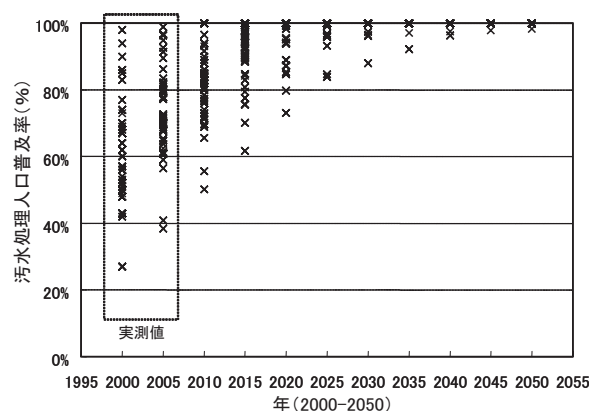


図 1 都道府県ごとの汚水処理普及率の予測。

オマスはエネルギー資源と見なされ、集中的な収集・処理のもとにバイオガス生産が行われる。一方で、地域重視・自然志向型のBシナリオでは家庭菜園など堆肥や有機飼料の需要が増え、バイオガス生産はコンポスト化と競合する。このようなことから、湿系バイオマスのうち、特に厨芥の分別回収率とバイオガス生産への利用状況について、表1のような仮定をおいて利用可能量を算出した。

2.3 バイオガスによる発電ポテンシャルの推定

このようにして予測された厨芥および汚泥の利用可能量から、石井ら<sup>8)</sup>を参考に、厨芥系のVS/TS比を0.95、メタン発生原単位を0.65 Nm<sup>3</sup>/kg-VTS、汚泥の強熱減量を78.6%、メタン発生原単位を0.28 Nm<sup>3</sup>/kg-VTSとして、メタン生成ポテンシャルの推計を行った。さらに、バイオガス発酵施設においてガスタービン発電をした場合の効率を現状で25%、技術革新により2005年に30%、2015年に40%、2025年以降45%に到達するものと仮定して発電可能量を算定した。

図2は、全国におけるシナリオ別の年間発電量である。2050年において、A、Bシナリオともに約3,700 GWh程度であった。厨芥系に着目すると、2005年から2050年における厨芥系バイオマス由来のエネルギー投入比(例:インプット(メタン生成時)/アウトプット(メタン由来エネルギー)の比率)は、両シナリオにおいて13%~16%であった。ただし、この値はバイオガス生成システムのみに着目しており、輸送等や消化液処理に係るエネルギーを考慮していない。スウェーデン

におけるバイオマス由来のメタン発酵ポテンシャルの研究では、都市有機系廃棄物由来のエネルギー投入比は、前処理、厨芥輸送、消化残渣輸送などを考慮し、約20%~60%と見積もっている<sup>9)</sup>。この研究では、乾重量あたりのメタン発生量が本研究の2.5~3.5倍となっていること、エネルギー投入比約60%の条件において、前処理工程のエネルギー消費量が総インプットの約50%程度を見積もっていることから、木屑や紙類も含まれているものと考えられる。また、近距離輸送に係るエネルギーインプットはエネルギー回収量と比較して数%と留まっており、本研究で用いた石井ら<sup>5)</sup>の検討と同様である。日本とスウェーデンとの単純比較には注意が必要であるが、その大きな違いはバイオマスの地域分布およびその特性にあると考えられ、バイオガス生成プロセスは同様であると仮定すると、木屑および紙類も含む前処理工程部分を除いたエネルギー投入比は18%~30%程度、厨芥系の場合、混合系の前処理工程よりもエネルギー需要が低減されるため、メタン発生量の違いを考慮すると、本研究における厨芥類系エネルギー投入比は妥当な範囲であると考えられる。ただし、本研究においても施設消費電力等の計算精度を上げる必要がある。

本研究において、エネルギー回収量は各シナリオにおいて地域差が存在するものの、2005年時点における電力およびガス供給を代替すると仮定した場合、二酸化炭素換算で年間約184万トン削減できることがわかった。ただし、将来的には系統電力およびガスの単位あたりの二酸化炭素排

表1 厨芥分別回収率およびバイオガス生産への利用率の仮定.

	都市地域・平野農業地域	中山間地域
厨芥分別回収率	両シナリオとも、2000年時点で0%、年間1%のスピードで上昇し2020年で20%、その後は年間2%の上昇で2050年で80%となる。	2000年で0%、年1%上昇で2020年で20%、Aシナリオはそのまま2050年で50%、Bシナリオは回収のインセンティブが働かず2020年以降は20%固定。
バイオガス生産への利用率	<p>&lt; Aシナリオ &gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・事業系厨芥利用方法(回収量のうち)メタン発酵→100%</li> <li>・家庭系厨芥利用方法(回収量のうち)メタン発酵→100%</li> <li>・汚泥利用方法(回収量のうち)メタン発酵→100%</li> </ul> <p>&lt; Bシナリオ &gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・事業系厨芥利用方法(回収量のうち)飼料・堆肥化→50%メタン発酵→50%</li> <li>・家庭系厨芥利用方法(回収量のうち)メタン発酵→100%</li> <li>・汚泥利用方法(回収量のうち)メタン発酵→100%</li> </ul>	<p>&lt; Aシナリオ &gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・事業系厨芥利用方法(回収量のうち)飼料・堆肥化→20%メタン発酵→80%</li> <li>・家庭系厨芥利用方法(回収量のうち)メタン発酵→100%</li> <li>・汚泥利用方法(回収量のうち)メタン発酵→100%</li> </ul> <p>&lt; Bシナリオ &gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・事業系厨芥利用方法(回収量のうち)飼料・堆肥化→50%メタン発酵→50%</li> <li>・家庭系厨芥利用方法(回収量のうち)メタン発酵→100%</li> <li>・汚泥利用方法(回収量のうち)飼料・堆肥化→50%メタン発酵→50%</li> </ul>

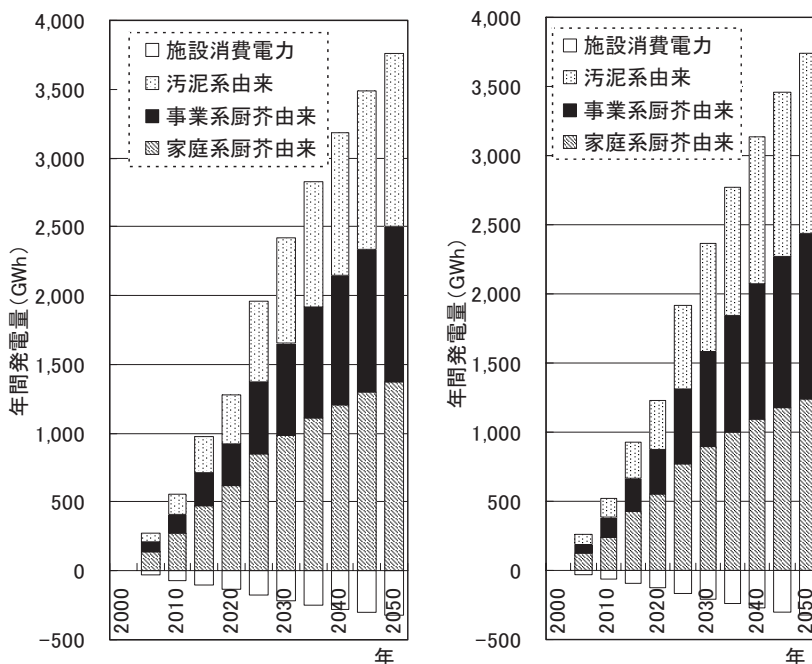


図2 全国におけるバイオガス生産による年間発電ポテンシャルの予測。  
(左：Aシナリオ，右：Bシナリオ)

出原単位が低下する事が考えられるため、二酸化炭素換算の議論は注意が必要である。シナリオ間の比較では、シナリオ B において堆肥化との競合により、家庭系および事業系厨芥回収量は少ないが、人口が多い分だけ汚泥系の発生および回収が進む結果、同様の発電ポテンシャルが期待できることを示している。また 2010 年、2015 年におけるマイクロガスタービンにおける効率の向上がエネルギー回収に大きく影響している。逆に、バイオガスからの発電技術の将来的な効率向上をどのように仮定するかが、将来の供給ポテンシャルの推定に影響を与えているとも言える。

### 3. 建設発生木材によるバイオエタノール生産ポテンシャルの推定

#### 3.1 ポテンシャルの推計手法

建設発生木材からのバイオエタノール生産ポテンシャルの推計手法の概要を図 3 に示す。まず、各シナリオにおける将来世帯数から算出された都道府県ごとの住宅ストック床面積から、各年における新築および解体住宅床面積を建て方別（戸建て・集合）、構造別（木造・非木造）に算出する<sup>5)</sup>。この値から、住宅構造別の木材使用量原単位<sup>10)</sup>を用いて新築時・解体時の廃木材発生量を推定した。

木質などのリグノセルロース系バイオマスからのバイオエタノール製造については、高効率化、

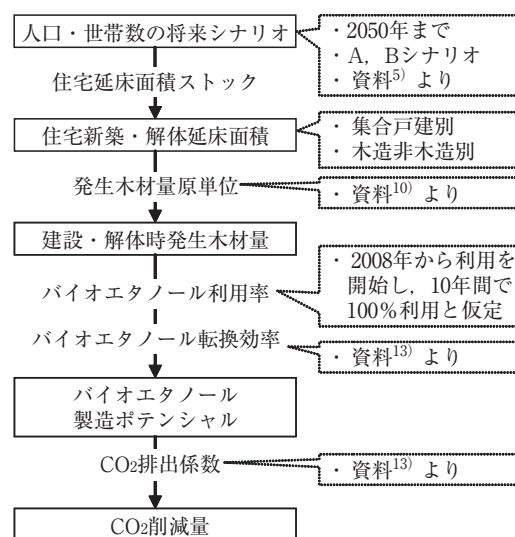


図3 建設発生木材からのバイオエタノール生産ポテンシャルの推計手法の概要。

低コスト化のための技術開発が進んでいる段階であるが、いくつかの検討例が存在している<sup>11)~13)</sup>。ここでは、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の研究プロジェクト<sup>13)</sup>で行われた検討例を参考に、バイオエタノールへの転換効率やエネルギー収支を計算した。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 1 t あたり 290 L）<sup>13)</sup>を用いて製造ポテンシャルを推定した。

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)については、トウモロコシやサトウキビなど、栽培系バイオマスについてさまざまな議論が行われている<sup>14)-16)</sup>。ここでは、前述のNEDOの研究プロジェクト<sup>13)</sup>から算出されたCO<sub>2</sub>排出係数(0.02 kg-CO<sub>2</sub>/L(=0.0009 kg-CO<sub>2</sub>/MJ))と、ガソリン製造プロセスのCO<sub>2</sub>排出係数(2.71 kg-CO<sub>2</sub>/L(=0.0784 kg-CO<sub>2</sub>/MJ))<sup>17)</sup>を利用して、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。

### 3.2 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4に示す。また、ストック床面積から推定された新築・解体床面積も図4に併せて示す。両シナリオとも、将来の人口および世帯数の減少とともにストック床面積が減少し、解体床面積は2050年までの間はさほど減少しないものの、新築床面積は大きく減少している。また、Aシナリオではより人口が減少するため、Bシナリオより住宅ストック、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た。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、図4中の新築床面積については5年ごとにやや大きな変化が起こっているが、これは既存の住宅ストック床面積について5年ごとのデータとして利用していることによるものである。

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、

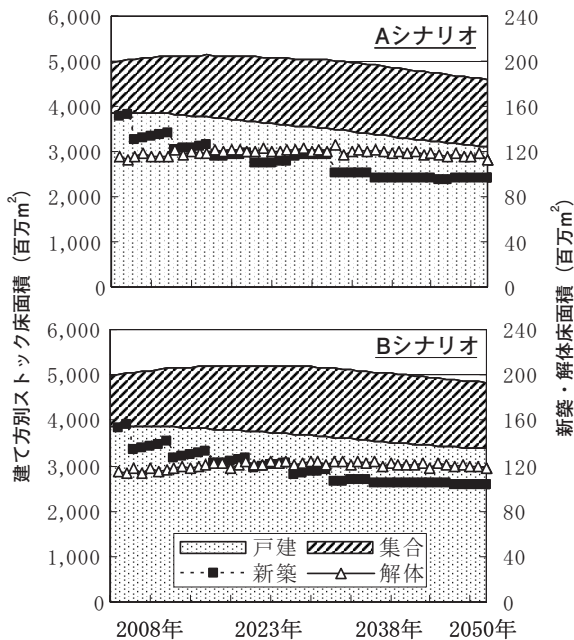


図4 建て方別住宅ストックの変動と新築・解体床面積。

2050年ではAシナリオで10.2百万t、Bシナリオで10.9百万tとなる。新築・解体床面積の減少のため、建設発生木材量は徐々に減少することが示された。

### 3.3 エタノール生産ポテンシャルとCO<sub>2</sub>削減量

2050年の都道府県ごとのバイオエタノール生産ポテンシャルを図5に示す。この図で、各都道府県の左側の赤色の棒グラフはAシナリオを、右側の青色の棒グラフはBシナリオの結果を表す。生産ポテンシャルは、住宅ストックが多い三大都市圏などの地域で大きくなっている。また、AシナリオはBシナリオと比べて人口がより減少するばかりでなく地方での人口減少が顕著になるが、バイオエタノール生産ポテンシャルもBシナリオと比較して小さくなっている。

日本全国での、2050年までのバイオエタノール生産ポテンシャルの変化を図6に示す。生産ポテンシャルは徐々に減少し、2050年にAシナリオで3.0百万kL(62.8PJ)、Bシナリオで3.1百万kL(66.7PJ)となる。これは発熱量換算で、2002年時点のガソリン消費量58.4百万kL(2,020.6PJ)の約3%に相当する。つまり、2050年におけるガソリン消費量が現在と変わらないとした場合、全てのガソリンがE3(エタノール3%混合ガソリン)と代替可能となるようなバイオエタノールを供給できることになる。

上記の結果から、日本全国での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、2050年にはAシナリオで4.9百万t、Bシナリオで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。

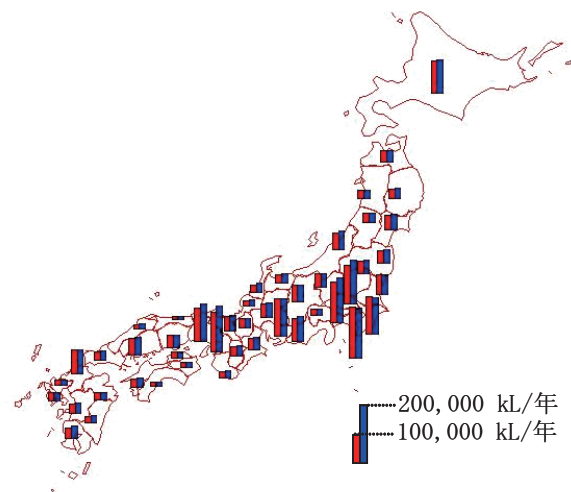


図5 2050年の都道府県ごとのバイオエタノール生産ポテンシャル。(■: Aシナリオ, ■: Bシナリオ)。

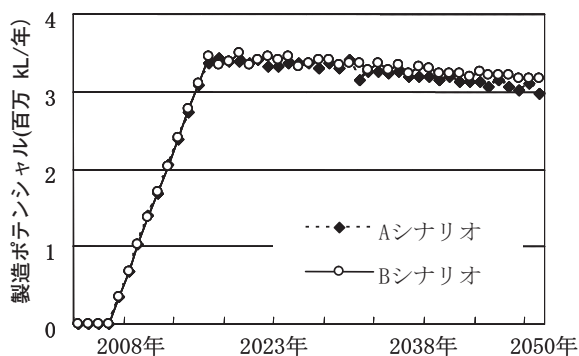


図6 日本全国でのバイオエタノール生産ポテンシャルの変化。

#### 4. まとめ

本稿では、廃棄物系バイオマス資源のうち、厨芥や下水汚泥といった都市湿系バイオマス、および建設発生木材を対象として、都市湿系バイオマスについてはバイオガス生産、建設発生木材についてはバイオ燃料化を技術オプションとした場合の超長期的な供給ポテンシャルを、日本の社会の将来像を表す2つのシナリオの下に推定した。

都市湿系バイオマスからのバイオガス製造においては、年間約1.8百万t、建設発生木材からのバイオエタノール製造については約5.0百万t程度の二酸化炭素排出削減がポテンシャルとして示された。都市湿系バイオマスについてはコンポスト製造との競合を含めているのに対し、建設発生木材については木材チップとしてのマテリアルリサイクルを考慮に入れていないなど、それぞれのポテンシャルの算出において多くの仮定を用いているため、これらの数値を単純に比較すべきではないし、その解釈には十分な注意が必要である。一方で、2つの社会像の下でのこれらのポテンシャルには、大きな差はないことが示された。

本稿では、バイオマスの賦存量から量的な観点で供給ポテンシャルを解析したが、それぞれの技術オプションの将来における費用の変化を推定することにより、より現実的な導入量の将来予測が可能となる。さらには導入可能と考えられる複数の技術オプションについて同様の解析を行うことにより、ある地域においてどのバイオマスをどのように利用していくかについて戦略的に検討するための材料を提供しうるものと考えている。

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。

#### 引用文献

- 1) 農林水産省(2007)バイオマス・ニッポン総合戦略, 平成19年8月.  
([http://www.maff.go.jp/biomass/pdf/h18\\_senryaku.pdf](http://www.maff.go.jp/biomass/pdf/h18_senryaku.pdf))
- 2) Forestry Commission England(2007) A Woodfuel Strategy for England.  
(<http://www.forestry.gov.uk/england-woodfuel>)
- 3) Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany (2007) Development of renewable energies in 2006 in Germany.  
([http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/hintergrund\\_zahlen2006\\_eng.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/hintergrund_zahlen2006_eng.pdf))
- 4) EurObserv'ER(2006) Solid Biomass Barometer 2006. European Commissions.  
([http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/bioenergy\\_publications\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/bioenergy_publications_en.htm))
- 5) 国立環境研究所 他(2007)脱温暖化2050研究プロジェクト. 平成19年8月.  
([http://2050.nies.go.jp/index\\_j.html](http://2050.nies.go.jp/index_j.html))
- 6) 羽原浩史・松籐敏彦・田中信壽(2002)事業系ごみ量と組成の事業所種別発生・循環流れ推計法に関する研究. 廃棄物学会論文誌, 13, 315-324.
- 7) 日本下水道協会(2005)平成15年度版下水道統計行政編. 日本下水道協会.
- 8) 石井 暁・花木啓祐(2006)川崎市下水処理場における有機性食品廃棄物を利用したエネルギー回収および二酸化炭素削減ポテンシャルの推定. 土木学会環境システム論文集, 34, 443-453.
- 9) Berglund, M. and P. Börjesson(2006) Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. *Biomass and Bioenergy*, 30, 254-266.
- 10) 国土交通省(2002)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.
- 11) Aden, A., M. Ruth, K. Ibsen, J. Jechura, K. Neeves, J. Sheehan, B. Wallace, L. Montague, A. Slayton and J. Lukas(2002) Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover. National Renewable Energy Laboratory, US Department of Energy.  
(<http://www.nrel.gov/docs/fy02osti/32438.pdf>)
- 12) Ballesteros, M., J. M. Oliva, M. J. Negro, P. Manzanares and I. Ballesteros(2004) Ethanol from lignocellulosic materials by a simultaneous saccharification and fermentation process(SFS)

- with *kluveromyces marxianus* CECT 10875. *Process Biochemistry*, 39, 1843-1848.
- 13) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2006)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.
- 14) Farrell, A.E., R. J. Plevin, B. T. Turner, A. D. Jones, M. O'Hare and D. M. Kammen (2006) Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science*, 311, 506-508.
- 15) Pimentel, D. and T. W. Patzek (2005) Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. *Natural Resources Research*, 14, 65-76.
- 16) Blottnitz, H. V. and M. A. Curran (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, 607-619.
- 17) 石油産業活性化センター(2002)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.
- (受付 2007 年 9 月 3 日, 受理 2007 年 11 月 26 日)

