

# 未来を拓くバイオマス利用技術

東京大学大学院農学生命科学研究科 生物・環境工学専攻 教授 横山 伸也

## 1. はじめに

木材、草、畜産糞尿や生ゴミなど動植物から生まれ、一定量集積しエネルギーやマテリアルに利用できる資源のことをバイオマスと称する。バイオマスを最終的に燃焼して利用すれば二酸化炭素を放出するが、同量の二酸化炭素が光合成によりバイオマスとして固定されれば、正味で大気中の二酸化炭素濃度に変化を与えない。この性質をカーボンニュートラルと称している。バイオマスは他の再生可能エネルギーと比較してユニークな特長がある。それはバイオマスが有機性であることで、電気や熱以外にメタン、メタノール、エタノールのような化学品や輸送用燃料を製造できることにある。化石資源と比較してその分布密度が希薄であり、収穫や運搬にコストがかかるなどの欠点もあるが、適切に利用すれば環境負荷の低い、かつ循環して使用できるエネルギー源として有望である。

地球温暖化防止、循環型社会形成、戦略的産業育成、農山漁村活性化等の観点から、農林水産省をはじめとした関係府省が協力して、バイオマスの利活用推進に関する具体的取組や行動計画を「バイオマス・ニッポン総合戦略」として2002年12月に閣議決定した。2006年3月には、これまでのバイオマスの利活用状況や2005年2月の京都議定書発効等の戦略策定後の情勢の変化を踏まえて見直しを行い、国産バイオ燃料の本格的導入、林地残材などの未利用バイオマスの活用等によるバイオマスタウン構築の加速化等を図るための施策を推進している。2009年11月末でバイオマスタウンの目標数300に対して220を超える市町村が名乗りを上げている。またバイオエタノールやバイオディーゼル燃料の導入促進のために、2008年3月にはバイオ燃料技術革新計画が策定された。2009年6月にはバイオマス活用推進基

本法が施行され、電気事業者やガス事業者が一定量の新生エネルギーの購入義務を負うエネルギー供給構造高度化法が同年7月に制定され、バイオマスを巡る環境が整いつつある。

バイオマスは農業や林業と密接な関係にあり、農業残渣や林業から排出される林地残材や間伐材、あるいは製材所で排出される木くずなどがエネルギーやマテリアルの原料として利用できる。このことは新産業の創生、雇用の確保、農林業の活性化にも貢献できる。

バイオマスは多種多様な形態をとり、化学的性質や物理的性質も異なるために変換技術も多様になる。以下に、バイオマスの代表的なエネルギー変換技術を紹介する。

## 2. 直接燃焼発電

化石燃料と比較するとバイオマスは原料のばらつきが大きく、直接燃焼させた場合に、燃焼温度と発熱量をコントロールし難いという欠点がある。また、バイオマスを大量に集積するのは難しいため、世界的にみても最大規模で10万kW以下であり、石炭火力発電や天然ガス発電に比べて規模が小さい。

秋田県能代森林資源利用協同組合の能代バイオマス発電所では、スギ樹皮、製材工場の廃材を粉碎加工し、ボードの原料等の再資源化・燃料化を行うとともに、発電設備を備えた木くず焚きボイラーで電気と熱を供給する事業を行っている。図1は能代バイオマス発電所のシステムフローである<sup>1)</sup>。

計画規模では年間で約5万5千トンの木質系バイオマスを原料とし、発電効率は15%程度で総合効率85%を目標としている。木質系バイオマスを含めてバイオマスのエネルギー利用では収集が課題であるが、能代では地

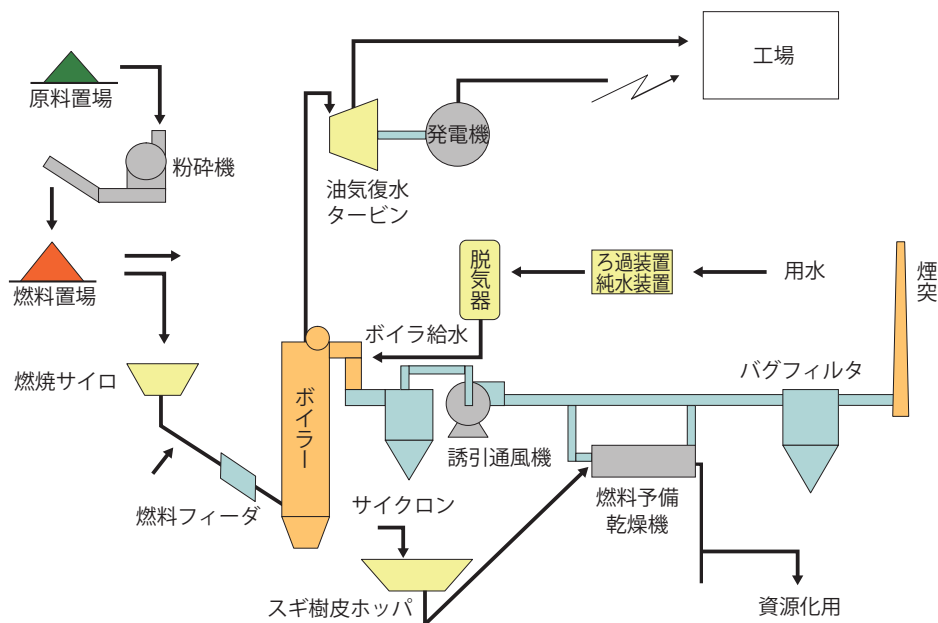


図1.能代バイオマス発電所のシステムフロー

域内の廃棄物収集運搬業者の協力を得て行っている。すなわち、組合員が持ち込む樹皮等に対してはシステム側が購入し、組合員以外は処理費用として運搬業者に処理費用を支払う。組合員分のバイオマスは運搬業者に粉碎・乾燥作業を委託し、運搬業者は施設を利用することができる。一方、組合員以外のバイオマスは運搬業者が粉碎・乾燥し、生産された燃料は全量を組合が購入することになっている。この地域は製材工場も多く、残材もある程度発生するため、蒸気を大量に使用するボード会社やチップ会社と連携することが事業成功の鍵となる。ただし、間伐材の収集や運搬はコスト高につながるために、安定して木質バイオマスを供給することは容易ではない。間伐しても運び出す運搬費用がかかるため、森に放置されたままの間伐材が増えつつあった。しかしながら、ソニーが、バイオマス発電までの運搬費用を支援することを秋田県に提案し、これによって間伐がより進み、能代の森を育てながら、同時に間伐材の木くずでグリーン電力を作る仕組みができた<sup>2)</sup>。

発電された電力については、従来は売電単価が安いことから売電はせず、場内で利用することが一般的であったが、電力事業者に一定量以上の再生エネルギーの購入を義務付けた「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法：RPS法 (Renewable Energy Portfolio Standard)」が2006年6月に公布され、状況

は変化しつつある。

バイオマス利用が進んでいる北欧諸国の中でもスウェーデンでは、地域暖房を主な目的とした木質系バイオマスを用いてコージェネレーションを行っている。人口が約20万人のエンコピング市では、木質バイオマスのコージェネレーションにより熱需要の100%、電気の60%を賄っている。冬場は地域熱供給システムにより、約90℃の温水を各家庭に配管で供給し暖房に供している。夏場は暖房の熱需要がないので原則的に発電はしていない。発電用の木質バイオマスは、枝部、樹皮、チップ、建設廃材、エネルギー作物などである。エネルギー作物とはヤナギ (Salix) のことであり、年間で乾燥重量換算でヘクタール当たり20トンの収穫がある。筆者が訪れたヤナギのプランテーション現場では、所有者は80ヘクタールの土地にヤナギを植林し、伐採したヤナギをチップ化して電力会社に販売していた。灌漑には下水処理場からの処理水を使っている。これにより下水処理場側は二次処理の手間が省け、プランテーション側は無料で灌漑でき両者にとって便益がある仕組みになっている。スウェーデンでは熱供給のためのバイオマス利用を促進するために、化石燃料である石炭、重油などに課税してバイオマス燃料の価格を相対的に下げている。国民の合意の下で、このような政策が具現化していることも見逃せない。

### 3. 木質ガス化発電

バイオマス発電に利用する場合、直接燃焼による蒸気サイクル方式が制御のしやすさと原料を選ばないという点で有利である。しかし、蒸気サイクルはスケールメリットが大きく、高い効率を実現するには一定以上の規模が必要となる。このことは分散型エネルギーであるバイオマスの特徴と相反するものであり、広範囲の地域からバイオマスを収集する必要が生じる。特に日本のように起伏の多い土地ではバイオマスの運搬コストが高くなり、運搬に要するエネルギーも問題となる。そこで、蒸気サイクルに比べるとスケールメリットが小さく、小規模でも比較的高い効率が期待できるガス化発電設備の開発、普及が進められている。ガス化発電は燃料の一部を燃焼させて発生する熱によって残りの燃料を熱分解し、可燃性のガスを発生させて熱機関を駆動する方式である。熱機関にはレシプロのガスエンジンかガスタービンが用いられる。ガスタービンは従来中規模以上の設備に限られていたが、小型化、パッケージ化が進められており、数10kWのマイクロガスタービンも開発されている。またガス化炉については石炭ガス化等の研究成果を継承し、高度の技術が蓄積されている。

スウェーデンではベクショー大学等によるCHRISGAS (Clean Hydrogen-rich Synthesis Gas) プロジェクトの実証実験がバルナモにおいて行われた。このプラントでは木質燃料を20気圧の高圧下で加熱してガス化し、4MW

のガスタービンを駆動、排熱で2MWの蒸気タービンを駆動し、計6MWの電力を得、これと同時に9MWの熱を供給した。バイオマスの消費量は毎時4トンであり、32%の発電効率が達成されたと報告されているが、現在はBTG (Biomass to Liquid) 用の合成ガス製造に使われている<sup>3)</sup>。

国内のガス化施設の比較的大規模な事例として、山形県村山市にある、やまがたグリーンパワー(株)の木質ガス化発電施設がある。図2はこの発電施設のシステムフローである<sup>4)</sup>。この施設は平成20年から本格的な稼働を開始している。向流型(アップドラフト)ガス化炉で発生するガスにより大型のレシプロエンジン2基を駆動し、合計で2000kWを発電している。このうち300kWを内部動力として使い、残りを売電している。発電効率は29%と高い。原料は間伐材、剪定枝、ダム流木などで最大で一日約60トン、年間で約20,000トンを使用し、年間で約15,000MWhの電力を生み出している。原料の含水率に対する許容範囲が広いのも特徴の一つで、含水率50%程度の生チップも利用できる。燃料の木質バイオマスはガス化炉の上部から、ガス化剤の空気と水蒸気は下部から供給される。同社の説明によれば、ガス化炉内では上から、乾燥領域(～150℃)、熱分解領域(150～800℃)、還元領域(800～1,100℃)、酸化(燃焼)領域(1,100～1,300℃)が形成されている。上部から排出されるガスは冷却されてタールが分離され、集塵機を通過しエンジンに供給される。ガス化発電

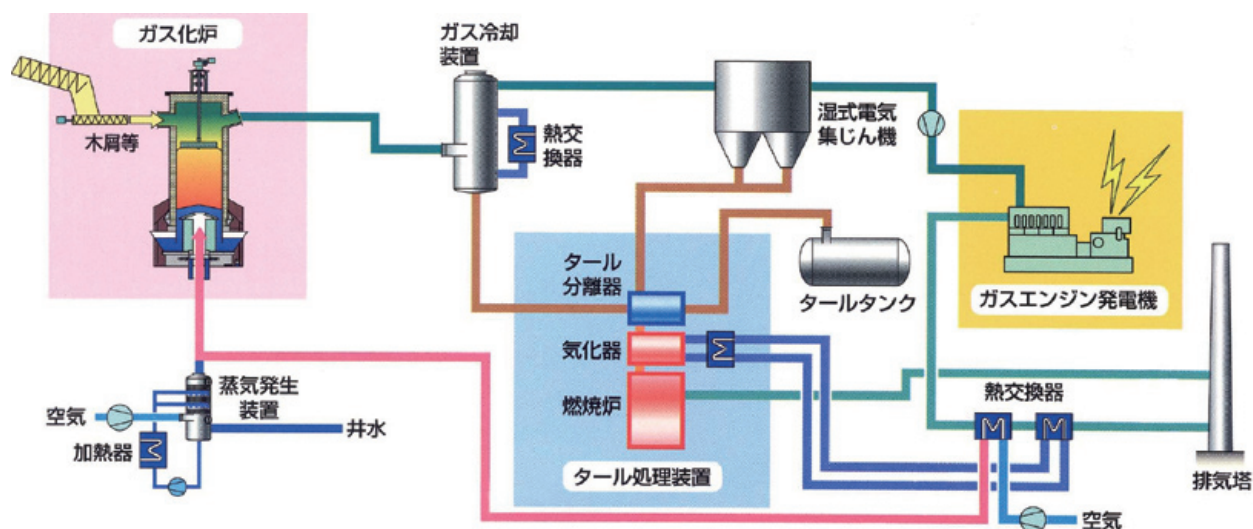


図2. やまがたグリーンパワー(株)のガス化発電所のシステムフロー

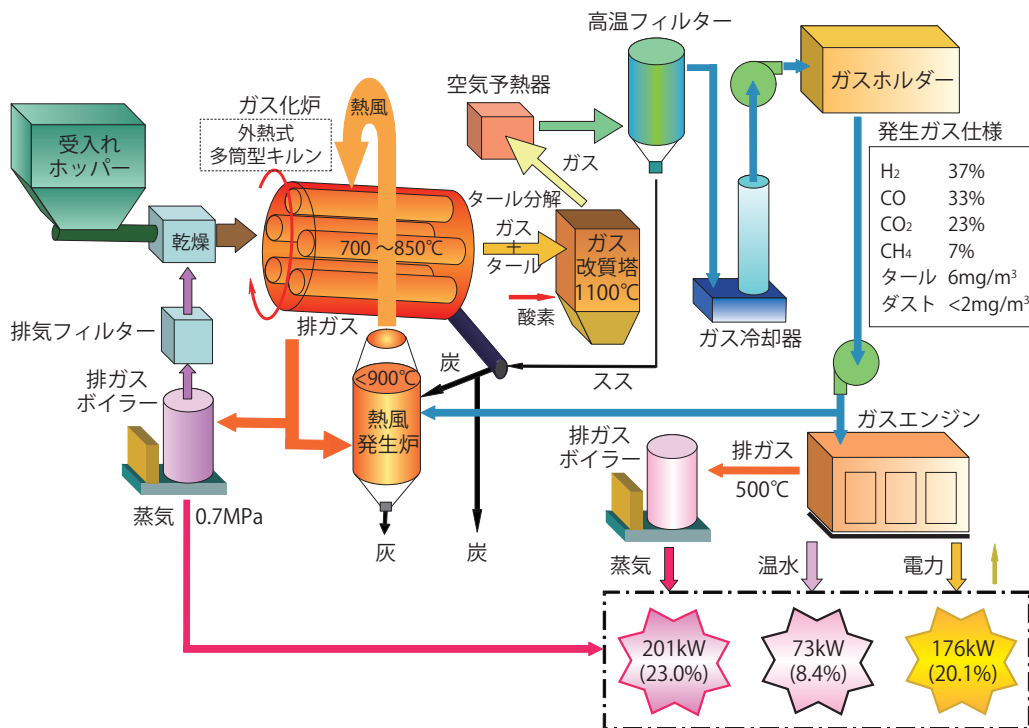


図3.中外炉工業 (株) のガス化発電プラントのフロー

ではタールの処理が問題になることが多い。向流型(アップドラフト)ガス化炉は、ダウンドラフト型に比べると熱効率が低い反面タール分が多いという欠点がある。この施設ではタールを副産物として分離・回収して薬品会社に売却し、タールが発生しやすいという欠点を逆手にとって利用している。

山口県岩国市では中外炉工業(株)のプラントによる実証試験が行われている。図3に示すように、多筒型ロータリーキルンによってガス化される。外熱方式により水分16%の乾燥バイオマスを毎時210kg熱分解し、生成したガスは改質器でタールが燃焼され高温フィルターを通過してガスエンジンに供給される。ガス化炉で生じるチャーは燃焼され、熱風発生炉を通してガス化の加熱に使われる。ガスエンジンで176kW(うち40kWは所内消費)の発電と274kWの熱を供給し、発電効率は約20%である<sup>5)</sup>。熊本県阿蘇市にも同じロータリー式ガス化炉があり、草本系バイオマスであるススキを原料としてガス化し発電を行っている。タール除去に使用する酸素製造のために電力を使わなければならないという弱点があるものの、原料として多様なバイオマスに対応でき注目されている。

#### 4. バイオエタノール生産

近年、世界のバイオエタノール生産量は急増の一途である。図4に示すように、バイオエタノールの生産量は2001年からの5年間で1.6倍に増加しており、2006年時点で約5,000万kL生産されている。2006年からはブラジルに代わってアメリカが世界一の生産国となっており、アメリカ、ブラジルの2ヶ国で世界の生産量の約7割を占める状況である。

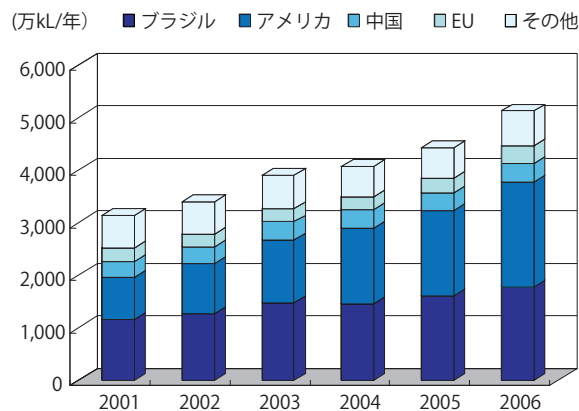


図4 世界のバイオエタノール生産量の推移

バイオエタノール生産システムが成立するためには、エネルギー収支 (EPR : Energy Profit Ratio) が1以上であること、また温室効果ガスの削減効果があることが必須条件である。EPRとは産出されるエネルギーをバイオエタノール生産システムに投入されたエネルギーで除した値である。

米国でのトウモロコシからのバイオエタノールの生産が急増したことにより、大豆などの作付面積が減少し、これが結果として食料価格を引き上げることになったと報じられた。バイオエタノール生産が食料価格に及ぼす影響について、世界銀行、国際食糧政策機構、農林水産政策研究所、FAO (世界農業食糧機関) などが調査や分析を行っている。世界銀行のDonald Mitchell氏によれば、バイオエタノールが食料価格に及ぼす影響を分析する場合、対象とする期間、地域、対象とする食料の種類、価格の種類、分析方法などについて留意すべきとしている<sup>6)</sup>。この指摘の通り、分析に関して統一された対象や方法はないものの、食料価格に及ぼす影響は最大で70%から最小で3%まで幅広い結果となっている。農業分野における比較的中立的な機関と評価されている国際食糧政策研究所の分析によれば、米国のバイオエタノール需要が食料価格に与える影響として、トウモロコシで21%、砂糖では12%の価格上昇影響があると試算されている。一方、ブラジルでは一部でバイオエタノール生産の増産により砂糖生産が抑制されたとの情報もあるが、実際にはバイオエタノールも砂糖も増産されている。また、一般論ではあるが、バイオエタノール増産で作物の価格が上昇し、その結果として一般家庭の食料品まで高騰することが非難されているが、世界的には農民の多くは貧困層であり、作物価格の適正な上昇自体は非難されることではないともいえる。

バイオエタノール生産のEPRはどうなっているのだろうか。表1は米国におけるトウモロコシからのバイオエタノール生産時とブラジルにおけるサトウキビからのバイオエタノール生産時のEPRと二酸化炭素削減効果を示している<sup>7)</sup>。米国においては投入エネルギーに対して生産エネルギーは1.3でかろうじて1を上回っており、温室効果ガスの排出はガソリン使用に比べて22%の削減効果があるとされている。EPRが小さすぎるという批判もあるが、副生するDDGs (Dried Distillery's Grains) と称する乾燥飼料を考慮すべきとの意見もある。ブラジルの場合EPRは8と1を大きく上回っており、温室効果

表1 米国とブラジルにおけるバイオエタノール生産のエネルギー収支と二酸化炭素削減効果

	米国	ブラジル
原料	トウモロコシ	サトウキビ
エネルギー収支 (EPR)	1.3	8.0
温室効果ガス削減率	-22%	-56%
混合率	10% 一部でE85	20~25%で義務化 E100も一部で実施

削減効果も56%あると報告されている。

ここで大事なことは、これらの値を固定的に考えて判断するのではなく、これらを一つの指標としてトウモロコシやサトウキビからのバイオエタノール生産の効率を向上させ、同時に、数値として表面には出てこない環境面や労働面の改善を図ることである。特に、ブラジルの大半の地域においては、サトウキビの収穫は機械化されておらず人手に頼っている。伐採前にはサトウキビを刈りやすくするために畑を焼きはらうので、煤煙が生じて労働環境は極めて劣悪である。このような肉体労働者の労働環境の改善も重要である。

現在、エタノールはサトウキビ、シュガービートなどに含まれる糖分や、米、麦、トウモロコシなどの穀物に含まれるデンプンなどから作られている。図5に示すように、通常は前者の場合、糖分を酵母により発酵し、後者の場合はデンプンを酵素により糖化した後に発酵する。この両方を併せて第一世代バイオエタノールと称している。これらに対して、セルロースからエタノールを製造しようというのが、今世界中で熾烈な競争をしているプロセスであり、第二世代バイオエタノールと称する。ただし、いずれのケースも発酵工程後の蒸留工程と脱水工程は共通である。通常は発酵によってエタノール

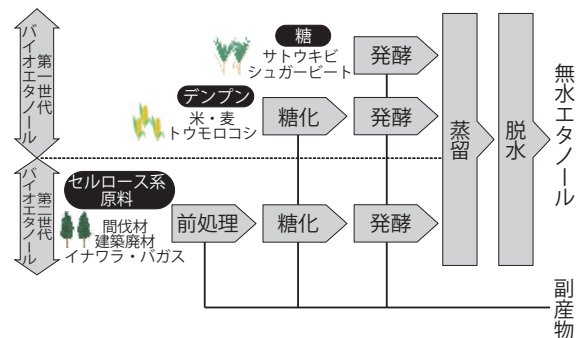


図5 バイオマスからエタノール製造のプロセス

ル濃度は5~6%になるので、これを蒸留してエタノール濃度を約95%程度に濃縮し、さらに脱水工程で99.5%以上の無水エタノールとする。ガソリンにエタノールを混合する場合、水分が含まれているとエタノールとガソリンが相分離を起こす可能性がある。このために蒸留・脱水は重要な工程でありコストもかかる。水分を選択的に吸着するモレキュラーシーブを用いた吸着法やゼオライト膜を用いた膜分離法があるが、さらに高効率で安価な方法が求められている。

従来のエタノール製造法では食料として使用される作物を原料としているので、食料との競合が避けられない。しかしながら、セルロース系バイオマス为原料として使用できれば、食料との競合が避けられることになる。現在、世界の穀物生産量は約20億トンといわれているが、これら作物から排出される残渣物や木質系バイオマスの資源量は膨大である。もとより木質系バイオマスは建材や紙・パルプの原料ではあるが、未利用分や廃棄物として焼却あるいは処分されている量もまた膨大である。このような非食料バイオマスからバイオエタノールを製造することは人類の夢といって過言ではない。しかし、技術的な難題や克服すべき経済性の問題もある。

セルロース系物質の主なものとしては、イナワラ、モミガラ、バガスのような農産系バイオマスと木質系バイオマスがある。木質バイオマスの場合、セルロースやヘミセルロースをリグニンから分離することが第一の課題である。次いで、セルロースやヘミセルロースを酸や酵素、あるいはこれらの複合的な使用によ

て糖化する必要がある。

酵素糖化法が実用的になるためには、活性が高いこと、外的なストレスで容易に失活しないこと、酵素の回収・再利用が可能で、安価に製造できることが求められる。セルロース系バイオマスの糖化技術、特に酵素糖化技術によるバイオエタノール製造は、経済性を考慮するとまだ実用化には時間がかかりそうである。

2007年4月末、石油元売り各社で構成する石油連盟は、首都圏（東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県）50箇所の給油所において、「バイオガソリン」の販売を開始した。バイオガソリンとは、バイオエタノール3%と石油起源であるイソブチレンから合成されたエチルターシャリーブチルエーテル(ETBE)を混合した燃料である。一方、農林水産省や環境省は、地域のバイオマスから生産されるバイオエタノールをガソリンに3%直接混合するE3導入を推進している。石油連盟はE3方式ではなくETBE方式を採用した理由として、エタノールは水に溶けやすく、水滴などによってガソリンに水分が混入し不具合が生じることなど安全性の問題を挙げている。地域バイオマスからエタノールを生産し、地域で利用するローカルシステムを想定すると、直接エタノールを混合するE3方式の方が簡便で導入障壁が少ない。現在行われている実証試験を通して、品質・安全性を含めた導入可能性を明らかにする必要がある。

わが国では、バイオエタノール生産量は2007年時点ではわずかに30klであった。図6に示すように、農林水産省や環境省は、目標である3.1万キロリットル達成

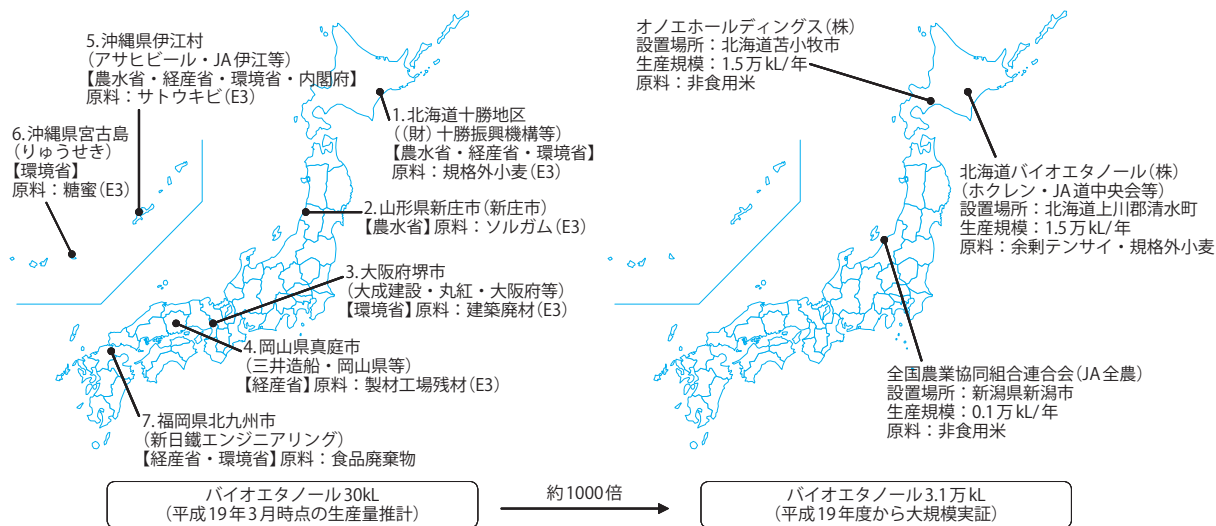


図6 わが国におけるバイオエタノール開発の現状と目標

に向けて、全国各地でバイオエタノール製造を推進している<sup>8)</sup>。

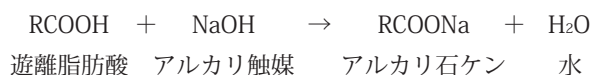
## 5. バイオディーゼル燃料の製造

植物油は3価の脂肪酸にグリセリンが結合したトリグリセリドと呼ばれる構造をしている。バイオディーゼル燃料 (Bio-Diesel Fuel) とは、一般に植物油の主成分であるトリグリセリドとメタノールとのエステル交換反応 (Transesterification) によって得られる脂肪酸メチルエステル (FAME: Fatty Acid Methyl Ester) を意味する。ディーゼルエンジンは約100年前にパリで開催された万国博覧会で、ドイツの技術者であるルドルフ・ディーゼルによってピーナツ油を使ってはじめて駆動された<sup>9)</sup>。植物油を直接ディーゼルエンジンで使用すると、燃焼室内に未燃カーボンが蓄積してエンジンに不具合が生じる。このために、温度を上げたり、石油系のディーゼルオイルに混合したりするが、メタノールとエステル交換反応を行ってディーゼル油程度に粘度を低下するのが一般的である。この反応にはさまざまな触媒が使用されるが、商業的なバイオディーゼル燃料の製造には、安全性やコスト面で有利な水酸化カリウムが使用されている。

図7に植物油のメチルエステル化反応式と模式図を示す。R1、R2、R3は脂肪族炭化水素を示し、炭素数は11から17程度である。すなわち、脂肪酸に3モルのメタノールを水酸化カリウムなどのアルカリ触媒下で反応させると、脂肪酸メチルエステルが生成し、副産物としてグリセリンができる。反応は大気圧下温度約60℃で

進行し、反応時間は1時間程度である。反応終了後は、層分離が生じ、上層にはエステルが浮上し下層にはグリセリンが沈降する。エステル層にはアルカリ触媒やグリセリンが残存しているので、これを除去するために温水で数回洗浄する。その後加熱し水分を蒸発させて、精製された脂肪酸メチルエステルを得る。

ここで原料となる植物油には通常、遊離脂肪酸が存在する。遊離脂肪酸が存在すると、次に示すようにアルカリと反応してケン化 (Saponification) 反応が起こる。



すなわち、脂肪酸のアルカリ塩である石ケンができる。アルカリ石ケンができるとグリセリン層と脂肪酸メチルエステル層との分離が困難になる。そのため、原料油脂中に遊離の脂肪酸がある場合には、アルカリで抽出する方法、吸着法、硫酸などで遊離脂肪酸をメチルエステル化する方法や、酸化カウシウムなどの固体酸を使ってメチルエステル化して除去する方法が報告されている<sup>10)</sup>。アルカリ触媒法では副産物として原料の約10%のグリセリンが生成する。グリセリンは精製すれば、化粧品や医薬品の原料として商品価値を有する。しかし、国内ではグリセリンは供給過剰気味であるために、さらなる有効利用法が求められているのが現状である。廃棄物としてメタン発酵の原料にしたり、そのままボイラー燃料として利用されているケースもある。大量にバイオディーゼル燃料を製造する場合には、この副生成物の有効利用技術の開発が必要となる。

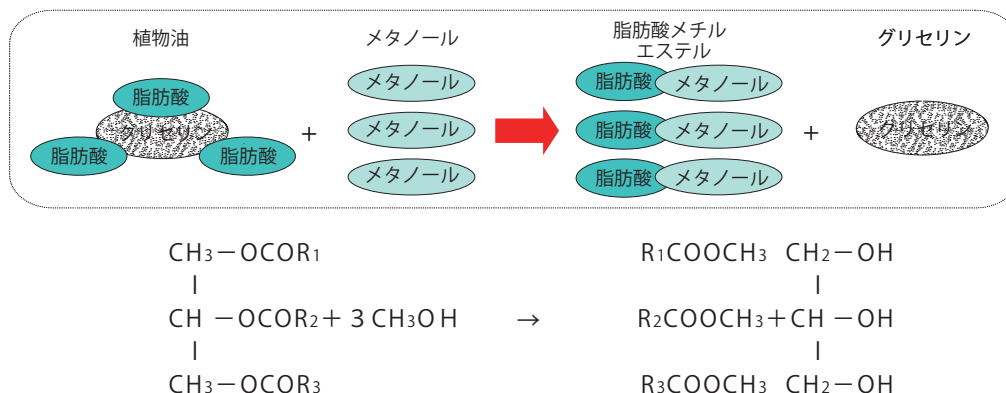


図7 植物油のアルカリ触媒によるエステル交換反応

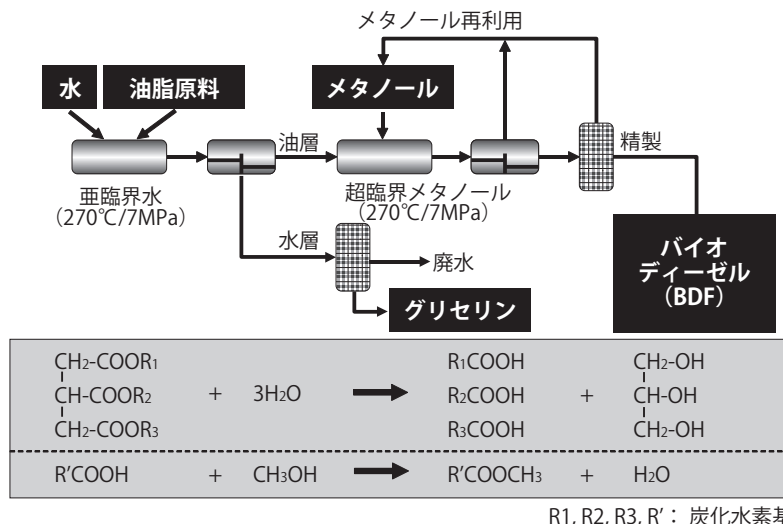


図8 2段階超臨界メタノール法 (Saka-Dadan 法)

坂らは、植物油を超臨界処理をすることで、触媒を必要としないかつグリセリンを副生しないプロセスを開発している。1段階のメタノール超臨界法では、油脂に対するメタノールのモル比が42、反応温度350℃、反応圧力20～40MPaが最適であったが、処理条件が過酷すぎるとして、2段階超臨界メタノール法(Saka-Dadan法)を提案している<sup>11-13)</sup>。図8は2段階超臨界メタノール法のプロセスフロー図とその反応式である。この方法は、まず油脂に水を添加して亜臨界条件で油脂を加水分解する。すると図中の反応式に示すように、遊離脂肪酸とグリセリンが生成する。次に遊離脂肪酸を含む油相にメタノールを加えて、超臨界条件で脂肪酸のエステル化反応を行うことにより、脂肪酸メチルエステルを得る。2段階法は1段階法に比べて反応条件が緩和されるため、反応器の材質に高価な合金を使用しなくて済み、生成した脂肪酸メチルエステルの熱変性も起こらない。また、グリセリンは加水分解によって水相に移動するためにエステル工程に関与せず、生成物中のグリセリン濃度が低減される。一方問題点としては、エステル化反応の逆反応により、微量ではあるが脂肪酸が反応系内に残存することがあげられる。このために再エステル化が必要であり経済性に課題がある。しかしながら、この方法はグリセリンを副成しないなどという優れた点も多く、実用化が期待されている。

わが国における年間のバイオディーゼル燃料の生産量は2008年段階で1万トン程度と推定できるが、最大規模は京都市のプラントである。以下、脂肪酸メチルエ

テルをバイオディーゼル燃料と称する。京都市では2004年6月より京都市南部クリーンセンター構内に設立された京都市廃食用油燃料化施設において、日量で約5,300リットル、年間で約160万リットルが製造されている。また、軽油混合油(軽油:バイオディーゼル燃料=80:20)も日量で約6,000リットル、年間で104万リットルのバイオディーゼル燃料が製造されている<sup>14)</sup>。ここで原料となる廃食品油は約9割がホテル、レストラン、料亭などからで一般家庭からは約1割である。一般家庭からの廃食品油は、市内約900拠点から回収している。100%のバイオディーゼル燃料は京都市の約220台のゴミ収集車に、軽油混合油は約80台市バスに使われている。

廃食品油からの製造プロセスのフローを図9に示す。原料中に含まれる不純物をフィルターで除去し、溶解水分を除去するために真空加熱蒸発処理を行った後、反応槽へ送液される。反応槽ではメタノールが加えられ、次いで触媒として水酸化カリウムが添加され、メタノールの沸点である65℃以下まで間接加熱されてエステル交換反応が進行する。所要時間が経過後、比重差により沈降したグリセリンを槽下部から引き抜き分離、除去を行う。高品質のバイオディーゼル燃料を得るために、二段反応方式が採用され、同様の操作が繰り返される。反応率の向上のために過剰に加えられた未反応メタノールは反応槽と分離槽に残留しているので、二段反応後真空加熱蒸発により未反応のメタノールを回収し、次の反応に再利用される。粗製の脂肪酸メチルエステルは、所要温度に加熱された洗浄水により、水溶性の遊離グリセリン

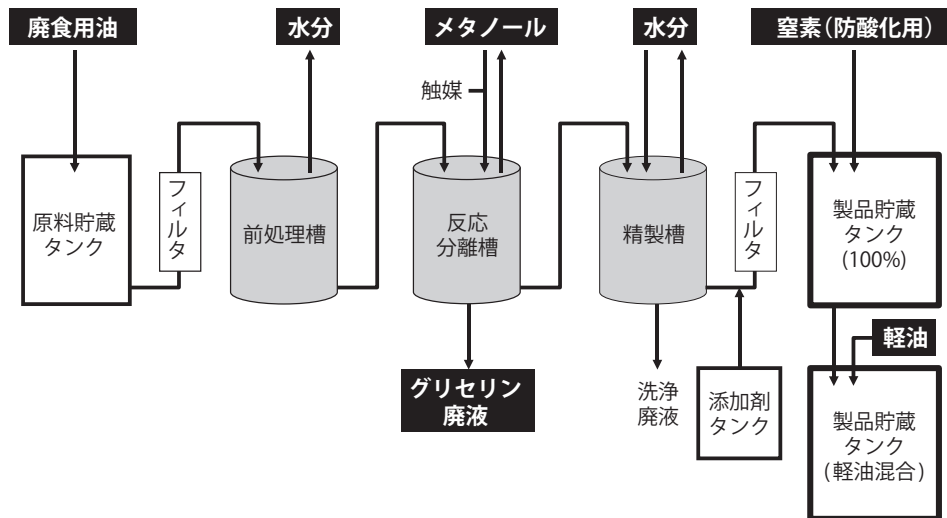


図9 京都市のバイオディーゼル燃料製造プロセスの概略

などの不純物が除去される。さらに、真空加熱蒸発により残留する水分が除去され、最終フィルターを経て精製されたバイオディーゼル燃料が得られる。

最近、原料植物を問わず獣脂も含めた広範な原料油脂を石油精製の水素化処理技術を応用して分解し、合わせて雑物を除去して作る水素化処理油（BHD：Bio Hydro-fined Diesel）が、新日本石油株式会社とトヨタ自動車株式会社により研究開発されている<sup>15)</sup>。この方法によれば、油脂を原料としつつ、既存の石油由来の燃料と何ら遜色のない、一般の軽油の規格に適合した燃料を精製することが可能であるとされる。BHDは油脂が水素化される過程で不純物が除去される。これまでに、減圧軽油留分とパーム油を混合して水素化分解処理を行い、パーム油の水素化分解により軽油留分の収率が向上することや、既存の石油精製で得られている軽油に近い性状の軽油留分が得られることが確認されている。

一般公道を走行する車両にバイオディーゼル燃料を使用すれば、軽油引取税が課税されることになる。バイオディーゼルを生産し販売を行うためには、軽油引取税を払わねばならない。バイオディーゼル燃料を軽油と混合して販売したり、自動車の使用者が自らバイオディーゼル燃料を購入したり製造して軽油と混合して使用する場合は、軽油引取税の課税対象となる。軽油引取税は地方税であり、各地の県税事務所での判断によって課税基準が決められる。わが国ではこれまでバイオディーゼル燃料についての規格が存在していなかったが、総合資源エネルギー調査会により、欧州規格を参考にして規格化が

検討された。この検討を受けて2007年に省令が公布され、バイオディーゼル混合燃料油の一般のディーゼル車への流通を念頭に、2007年3月に「揮発油等の品質の確保等に関する法律」の軽油の強制規格が改正された。この改正内容は、軽油へのバイオディーゼル燃料の混合率が5%以下とされ、トリグリセリド含有率、メタノール含有量等が追加されたものである。なお、この法律ではあくまで炭化水素油を対象とした規制であるため、炭化水素成分を含まないニートのバイオディーゼル燃料（含酸素燃料）はこの法律の規制の対象とはならない。

最近、ジャトロファ（南洋アブラギリ）が毒性を有することから食料と競合しないこと、比較的痩せた土地でも栽培が可能なこと、年間に複数回収穫でき農民の換金作物として有望であることなどから、世界各地で栽培され大規模な栽培計画が持ち上がっている。しかし、収穫量についても大幅な隔たりがあり長期にわたる正確な情報が得られていない。痩せている土地よりも肥沃な土地の方が、また施肥をしたほうが収穫量も多い。ジャトロファ自身は食料とは競合しないが、土地の獲得を巡っては食料と競合する可能性も生じる。ジャトロファに関しては、商業規模での生産を行うには長期にわたる正確な情報やデータの蓄積が必要である。

## 6. 嫌気性発酵によるメタン生成

メタン発酵とは種々の微生物の作用により有機物が段階的に分解され、最終的にメタンと二酸化炭素が生成す

る現象である。嫌気的条件下で反応が進行するために嫌気性消化とも呼ばれる。メタン発酵の原料となるのは、生ゴミ、食品廃棄物、下水汚泥、畜産糞尿、有機性排水などである。

メタン発酵は図10に示すように段階的に進行する。原料となる廃棄物には一般的に多種多様な有機物が含まれるが、これらの高分子が細菌により分解されて可溶化される。これにより、炭水化物やセルロースなどの多糖類は単糖に、タンパク質はペプチドとアミノ酸に、油脂はグリセリンと脂肪酸に低分子化される。次いで、酸生成細菌によって分解され、酢酸、ギ酸などの低分子有機酸や水素に変換される。そして、最終段階ではメタン生成菌によりメタンが生成する。メタン発酵により生成したガスをバイオガスと呼ぶが、一般的にはメタンが60～65%で残りが二酸化炭素と微量の硫化水素とアンモニアである。発酵した後に消化液(発酵液)が残る、この効果的活用が重要となる。すなわち、液肥として圃場に散布できれば経済的であるが、廃液処理をしなければならない場合はそのコスト負担が大きくなる。

メタン発酵は発酵温度により低温、中温(35℃)、高温

(55℃)と分類され、発酵形式により二槽式やUASB(Upflow Anaerobic Sludge Blanket)などに分けられる。エタノール発酵と並び長い歴史があり実用化技術である。課題としては、全量を変換できずに廃液やスラッジが出てしまうことであり、収率を上げるための高温処理、粉碎前処理などが検討される一方、副生する排液、スラッジの液肥利用やコンポスト利用の検討などが行われている。

図11に示すように北海道江別市の町村農場では、年間約4,800トンの乳牛糞尿を原料としてメタン発酵を行っている。デュアルフューエルエンジンによる発電を行っており、1,430kWh/日の電気をミルクプラントの動力に使用し、余剰分は売電している。また、発酵処理後の約5,000m<sup>3</sup>の消化液は液肥として圃場に還元している。このために化学肥料の施肥量も減らすことができ、コスト削減と環境負荷の軽減を図っている<sup>16)</sup>。京都府南丹市の八木エコロジーセンターでは、牛糞尿、豚糞尿、廃牛乳、オカラなどを年間約28,000トンを原料として、メタン発酵を行っている<sup>17)</sup>。発生するバイオガスは一日2,436m<sup>3</sup>でメタン濃度が65%程度である。この消化ガスをガスホルダーに貯えて脱硫塔で硫化水素を除去

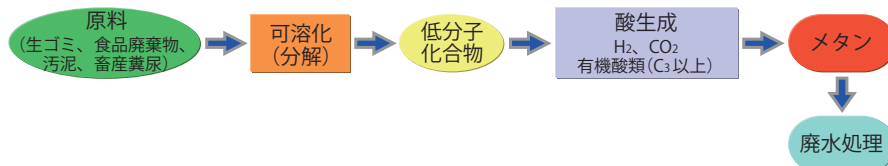


図10 メタン発酵のフロー図

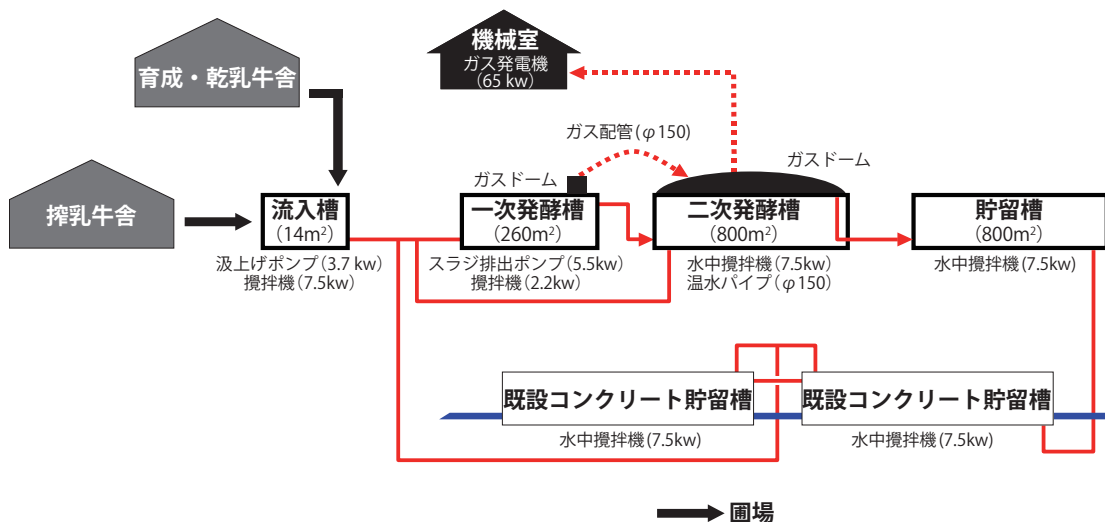


図11 町村農場のバイオガスプラントのフロー

した後、ガスエンジンで発電を行う。発電機は70kW級のエンジンが2基と80kW級が1基である。当初は所内消費電力のみを発電し、余剰ガスは焼却していたが、2001年度以降は余剰電力を売電している。運転コストは年間約7600万円で内訳は薬品費、メンテナンス費、労務費であり、収入(畜産糞尿やオカラの受け入れ費、堆肥販売費、売電料金など)であるが、支出が収入を上回り不足分を補助金で補っている。

バイオガスはスクラバーで水洗するだけで98%程度の純度のメタンガスが得られる。このガスを圧縮すれば液化するため輸送用燃料に使用できる。スウェーデンの多くの都市では市バスの半数をバイオガスからのメタンガスで運転している。人口が27万人のウプサラ市のバイオガスプラントでは、年間で8,000トンの厨芥ゴミを処理している。70℃で1時間殺菌した後、55℃で高温発酵しメタンを生産している。バイオガス中のメタン濃度は65%である。バイオガスをスクラビングし脱炭酸して98%にまでメタン濃度を上げ、250気圧で液化している。月に約10,000m<sup>3</sup>のメタンを市に売却しており、これは市バスの燃料に使われている。発酵液は液肥として無料提供している。バイオガスの利用法としては、発電やコージェネ用以外にこのような利用法も視野にいれるべきと考える。

## 7. おわりに

バイオマスは確かに再生可能な資源であり持続的な活用が可能とされているが、バイオマス資源そのものは農業や林業と密接不可分であり、農業や林業がビジネスとして持続可能でなければバイオマスエネルギーも持続的ではありえない。わが国は国土の約3分の2が森林で覆われており、その意味では世界有数の森林資源に恵まれた国でありながら、2005年度は5200万m<sup>3</sup>もの木材を輸入しておりこの量は世界一となっている。林業がビジネスとして十分機能しておらず、伐期を迎えた木材が山林に放置され、間伐も十分に行われていない。このために森林の保水能力が低下し、土砂崩壊、土砂流出、鉄砲水などの自然災害が度々生じている。長期的な視野にたって林業を再活性化し、林業をビジネスとして成立させることが肝要である。これを達成するためには長い年月が必要ではあるが、その補助策の一つがバイオマスのエネルギー利用と考える。このような政策により農林業の活性

化、新産業の創生、国土の保全などに加えて、温室効果ガスの削減など地球環境の保全にも寄与できると考える。

## 参考文献

- 1) バイオマスエネルギー導入ガイドブック(第2版a) pp.81-82、新エネルギー・産業技術総合開発機構(2005)
- 2) sonihttp://www.sony.co.jp/SonyInfo/Environment/ForTheNextGeneration/ecology/promotion/report01.html
- 3) Swedish Energy Agency, Energy in Sweden 2005 Fact and figures (2005)
- 4) やまがたグリーンパワー木質バイオマス発電所パンフレット、やまがたグリーンパワー(株)(2007)
- 5) 笹内謙一、森林バイオマスのガス化発電、8号pp.14-22、月刊エコインダストリー(2005)
- 6) D. Mitchel, A Note on rising food prices, Policy Options and World Bank Response (2008)
- 7) NATIONAL GEOGRAPHIC(日本語版)、13(10)、40~67、(2007)
- 8) 下村聡、国産バイオ燃料新時代、AGRI-COCOON農学におけるバイオマス利用FG発表資料(2008)
- 9) A. Demirbas: Biodiesel, p112-114, Springer (2008)
- 10) 高津淑人、山中真也、日高重助: バイオ液体燃料、p266-274、エヌ・ティー・エス、(2007)
- 11) 坂志朗: バイオ液体燃料、p294-30、エヌ・ティー・エス、(2007)
- 12) 坂志朗: 超臨界メタノール法によるバイオディーゼル燃料、日本エネルギー学会誌、84、p413-419(2005)
- 13) バイオディーゼル燃料製造のための油脂資源の現状と展望、エネルギー・資源、28(3)、p175-179(2007)
- 14) 京都市印刷物「バイオディーゼル燃料化事業への取り組み」第163042号
- 15) 小山成、壺岐英、井口靖敏、廣瀬正典、鶴谷和司、林倫: CO<sub>2</sub>削減を可能とする将来燃料に関する検討(パーム油水素化処理油の自動車用燃料適用性検討)、自動車技術会秋季学術講演会予稿集、JSAE 20065913(2006)
- 16) バイオマスエネルギー導入ガイドブック(第2版a) pp.150-151、新エネルギー・産業技術総合開発機構(2005)
- 17) 新エネルギーガイドブック pp.91、新エネルギー・産業技術総合開発機構(2008)

## profile

横山 伸也 (よこやま しんや)

昭和49年4月 工業技術院公害資源研究所入所  
 平成3年10月 資源環境技術総合研究所 温暖化物質循環制御部 バイオマス研究室長  
 平成6年4月 同所温暖化物質循環制御部長  
 平成13年4月 独立行政法人産業技術総合研究所 中国センター所長  
 平成16年3月 現職

