噴流床炉を用いたバイオマスガス化 - 液体燃料 (BTL) 合成に関する研究 - 日本の現状と将来展望 -

A Study of Biomass Gasification and Liquid Fuel (BTL) Synthesis Using an Entrained -flow Gasifier in Japan

小木 知子*・中西 正和*
Tomoko OGI and Masakazu NAKANISHI

Key Words: Biomass Gasification, Entrained-flow Gasifier, Bio Fuel, BTL, Bio Methanol, Bio Jet Fuel

1. 緒言

バイオマスは、2001年に政令改定により新エネルギー源として認知され、以来バイオマスエネルギーの導入が試みられている。2011年3月11日に起こった東日本大震災後、エネルギー政策の見直しが行われ、再生可能エネルギーの一層の導入が提言されている。

Fig.1に、主なバイオマスのエネルギーへの変換プロセスを示す。バイオマスの熱化学変換によるエネルギーへの利用法としては、「熱」、「発電」、「燃料（気体燃料、液体燃料、固体燃料）」があるが、このうち「発電」は、FIT（再生可能エネルギー電力固定価格買取制度）が2012年7月に導入されたこともあり¹⁾、バイオマス発電も増加し、2015年3月末時点で認定件数は280件、認定容量は200万kWに上がっている。²⁾「熱」、「発電」利用は、ほとんどが燃焼によるものである。（ガス化発電は現在実証段階である。）「熱」、「発電」は、他の太陽、風力、地熱などの再生可能エネルギーからも製造でき、2015年7月発表のエネルギー基本計画（長期需給見通し）でも、2030年度の総発電電力量とその電源構成（再生可能エネルギー22-24%、バイオマスは3.7-4.6%程度）が掲げられている。³⁾

一方、「燃料」は有機物であり、同じく有機物であるバイオマスからのみ製造が可能で、石油資源枯渇後を見据えて、今後有望と目されている。バイオ液体燃料については、2005年3月に新エネルギー導入目標が一部修正され、熱利用分野における2010年度目標値308万klのうち、「輸送用燃料におけるバイオマス由来燃料50万klを含む」と初めて「バイオ燃料」としての導入目標値が明記された。⁴⁾その後、「新・国家エネルギー戦略」（2006年5月、運輸部門の石油依存度を2030年までに80%へ低減）、「次世代自動車・燃料イニシアティブ」（2007年5月）、「次世代自動車

Fig.1 Biomass-to- Energy conversion technologies.

戦略2010」（2010年4月）が公表され、バイオ燃料（クリーンディーゼル燃料とバイオエタノール）の導入促進が掲げられた。また「Cool Earth エネルギー革新技術計画」（2008年）、「エネルギー供給高度化法」（2010年）の中でも、ガス化-BTL：Biomass-to-Liquid（ガス化により生じたガスから触媒合成により得られる液体燃料の総称）は、GHG（Green House Gas：温室効果ガス）削減効果も高く、2030年頃の実用化を目指した重点政策の一つに掲げられている。⁵⁾本稿では、BTL製造の技術について解説するとともに、当研究室で遂行しているバイオマスのガス化-液体燃料製造の研究について紹介したい。なお、エネルギー源としての「バイオマス」には、木質バイオマス、草本系バイオマス、都市ごみや下水汚泥などの廃棄物バイオマスなど、多岐にわたるが、本稿では、当面のガス化技術の原料として代表的な木質系・草本系バイオマスを対象として記述することをお断りする。

* 国立研究開発法人 産業技術総合研究所（〒305-8569 茨城県つくば市小野川 16-1）
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (16-1 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8569 Japan)

2. バイオマスガス化技術概要⁶⁾

ガス化は、バイオマス等を高温場におき、熱分解とそれに続く各種化学反応によりガスを主生成物として得るプロセスである。バイオマスの熱化学反応は、基本的には石炭と類似で、先行した石炭ガス化技術の応用から始まることが多い。その一方で、石炭とバイオマスでは、元素組成（代表的バイオマスである樹木は、平均組成 $C_1H_{1.5-1.8}O_{0.6-0.8}$ で表現され、酸素 O が多いのに対し、石炭は炭素 C が 60–95 % と炭素が多く、酸素 O はほとんど含まれない。）、主要構成成分の基本構造、含水率、灰分の種と含有量が異なり、それにより粉碎・搬送・ガス化特性等も大きく異なる。

バイオマスのガス化は、800 °C ~ 1100 °C の高温場にて、酸素比を抑えた条件下で反応させ、ガスを主成分として得る。（石炭の通常ガス化温度：1200 ~ 1600 °C に比べバイオマスは低温側にシフト。）ガス化過程は、きわめて単純化すると、「バイオマスの熱分解→熱分解物の 2 次反応→ガス」として表記されるが、

- ・原料が多種の複雑な高分子である、
- ・結合の切断に無数のパターンが有る、
- ・中間生成物として様々の化合物が生成する、
- ・ガス化剤として空気（酸素）や水蒸気を用いられることが多く、燃焼、部分酸化、水蒸気改質、シフト反応、水素化などの各種反応が関与する、

等から、実際の反応は極めて複雑である。途中で多様に複雑な反応経路を取るとはいえ、原料バイオマス（入口）と最終生成物（ガス）で押さえた物質収支式では、ガス化は以下のように表現できよう。

($C_xH_yO_z$: 原料バイオマス、木質バイオマスの場合、 $C_1H_{1.5-1.8}O_{0.6-0.8}$ で代表されることが多い。 C_nH_m はタールやチャーなどの副生成物。この副生成物の収率を如何に少なくするかが、ガス化の研究の鍵の一つである。)

バイオマス（木質/草本バイオマス）の主たる構成物質はセルロース、ヘミセルロース、リグニンであり、セルロースは単糖グルコースが、ヘミセルロースは、キシロース、アラビノース、マンノース、ガラクトースなどの各種単糖類が、脱水によりエーテル結合で連結した高分子鎖状物質である。リグニンはフェニルプロパンを基本単位とし、これらがエーテル結合（多）や炭素-炭素結合（少）で架橋している三次元構造の高分子である。さらに、木質/草本の種類によりヘミセルロース、リグニンは基本構成化学構造が異なり、含有灰分種/含有量も異なる。これらの構造/含有量の違いによりガス化特性が異なってくるので、その特性に応じた反応特性の把握が必要で、現在バイオマスに適したプロセスの開発が進められている。

ガス化の形式は、ガス化圧力、ガス化温度、ガス化剤、

Type of Gasifier	Fixed Bed		Fluidized bed	Entrained-flow	Rotary Kiln
	Down-draft	Up-draft			
Image of Gasifier					
Feedstock	Solid (Chip, Block)	Solid (Chip, Block)	Solid (Chip, Block)	Solid (powder), Liquid	Solid (Chip, Block)
Biomass Gasification Temperature	700~1100°C	700~900°C	650~900°C	800~1100°C	700~1000°C
	Small-scale	Small-scale	Medium~Large	(Medium~)	Medium scale

Gasifier systems incorporate a biomass fuel handling and feeding system, which is normally coupled by means of airlocks to the gasifier. The gasifier is usually a refractory lined vessel and fluid-bed or entrained-flow gasification is carried at temperatures of 750-850°C, at either atmospheric or elevated pressures. The product gas has to be treated so it matches the end-use application. For close-coupled gasifier-combustor systems there is no cleanup system the gas has to be free of particulates, to ensure the integrity of the turbine hot section.

Cited from IEA Bioenergy Agreement Task 33: Thermal Gasification, Country Report Overview by Dr. R. Ban (Task leader, at that time).

Table 1 Type and Properties of Gasifier for Biomass.

加熱方式、ガス化炉形式等のパラメータに応じて分類され、多種にわたっている。Table 1 に代表的なガス化炉とその用途を掲げる。後述の利用法に応じてガス化炉が選択されるが、液体燃料（BTL 製造）のためのガス化炉としては、流動床（+改質炉）か噴流床が適している、と言われている。（IEA Bioenergy, Task33 report 等、表の下部はレポートからの引用である⁷⁾）

ガス化プロセスの利用法

ガス化の利用法としては、ガス化発電とガス化-生成ガスの改質（触媒反応）による燃料製造に大別される。（Fig.1 下部参照）

ガス化発電は生成したガスを燃焼させて発電を行う。ガス化によりエネルギー量は減少するが、生成ガスは原料バイオマスに比べ高エクセルギーなので、直接燃焼発電とガス化発電の効率は実際には殆ど変わらないことが多い。小規模対応も可能であるため、原料の大量収集に制限があり大規模化が望めない木質バイオマスむきといえ、現在、実用化のためのプラント試験が世界の各地で行われている。ガス化発電は、ある一定量の発熱量を有するガスを生成できればよく、後述のガス化-液体燃料製造に比べて厳しい制限を受けないため、先に実用化されると目されている。

一方、ガス化で得られたガスを改質し、触媒などを用いて液体燃料（メタノール、DME、FT 油、LPG 等）を合成するガス化-（改質）-液体燃料製造のプロセスは、液体燃料に適した組成のガスを得ること（CO と H₂、いわゆる「合成ガス = Syngas」が主成分とし、通常 [H₂]/[CO]=1-3、組成のガスが望ましい。ただし、この値はターゲット生成物、触媒により異なる）、液体燃料合成用触媒を被毒させる微量成分の徹底除去が求められること（通常 1 ppm 以下、S や Cl はターゲットによっては 10 ppb を要求されることもあり）、副生タールも厳しい除去レベルが要求されること、などからハードルが高く、実用化のステージは発電用に比べ遅くなると目される。しかし製造される液体燃料は、貯蔵性に富み、長距離輸送が可能で、既存のシステムに直接

Fig.2 Fuel/Chemicals Synthesis via syngas.

DP-1 - The Gasifier and Gas Cooler

Fig.3 Schematic of DP-1 Gasifier and Gas Cooler.

代替できる、他のバイオマス由来の燃料に比較して GHG 削減効果が高い、などの優れた利点を有し、今後の開発が期待されている。

3. ガス化－液体燃料製造の概要

バイオマスから得られるガス（CO と H₂ 主の合成ガス）を原料にして、目的とする生成物に適した触媒と反応条件を選択することにより、多くの有用な物質を製造することが可能である。Fig.2 に、合成ガスを基点とする燃料 / 化学原料の製造体系を掲げる。⁸⁾

石油枯渇後の液体燃料をはじめとする各種化学原料製造に対応する「ポストペトロケミカルズ」（あるいはバイオリファイナー）の可能性を提示するものである。石炭や天然ガスからのメタノール合成などは既に商業化されており、バイオマスの分野においても、10 ～ 20 年以内に実用化を図るべく、現在開発が進められている。

4. バイオマスガス化－液体燃料製造の実証例

バイオマスガス化－BTL 製造の研究開発は欧米で盛んであり、特にスウェーデン、オランダ、ドイツ等で実用化を目指した実証規模の事業開発が行われている。比較的規模が大きい実証－実用化段階の例を 3 件ほど紹介する。

① CHEMREC 社のバルブ廃液ガス化－DME 製造 (Sweden)：強酸性の黒液 (black liquor : BL) を噴流床ガス化炉でガス化し、得られたガスから DME を製造。製造した DME はディーゼル車燃料として Volvo 社の車などに使用。粘稠かつ強酸性の液状物のガス化を行えるガス化炉の開発が一つのかなめとなっている。基礎から 10 年以上をかけ、段階的に大型化し、現在、Pitea* の DP-1 プラントが稼働中、さらにスケールアップして、Bio-DME プラント (4 t/d DME 生産目標) を建設、一部試運転稼働中。Fig.3 に DP-1 プラントのガス化炉部概要を示す。⁹⁾

② Bio-Liq プロジェクト (Germany, KIT : Karlsruher Institute

for Technology)：KIT を中心に、企業が参加し、木質草本系を急速熱分解 (Fast Pyrolysis) してバイオオイルを得、得られたオイルを加圧噴流床ガス化炉でガス化するという 2 段階プロセスを特徴とする。急速熱分解によるバイオオイル生産は各地で、これをガス化炉に集積させ、大量のオイルを加圧ガス化炉にてガス化する計画とのことである。得られたガスからは、DME や FT 油などの自動車燃料を製造する。現在、大型のガス化炉建設中との報告がされている。¹⁰⁾

③ Gussing* (Austria, TU Wien)：ウィーン工科大学を中心に開発された流動床型ガス化炉を用いる。(①と②はガス化原料が液状物であるため、対応できるガス化炉が噴流床型に限定される。) 本ガス化炉は流動床型で、「内陸国 (オランダや北欧のように海外からの木材 / 原料輸入に頼れない。大規模化困難)、中間山地で冬の熱源が必須」というオーストリアの国情に適したタイプのガス化炉を開発し、2002 年稼働当初は、ガスエンジン対応、後 CHP (Combined Heat and Power 熱電併給) を行っているが、さらなる発展系として、ガス化－FT 合成を試みている、とのことである。¹¹⁾ (*いずれの地名も、現地語ではその国独特の表記がされており、ここでの表記は英語風。)

日本でバイオマスエネルギー関連のプロジェクトは、農林省、経済省、環境省関連の事業の中で遂行されている。経済省－NEDO のバイオマスプロジェクトは平成 13 年度から開始されており、現在「戦略次世代」プロジェクトの中で、ガス化－(触媒合成) 燃料製造の複数プロジェクトが遂行されている。以下、筆者らが関係したガス化－BTL 製造のプロジェクトについて紹介する。

4.1 バイオマスの高速ガス化によるメタノール製造¹²⁾

NEDO・バイオマス高効率転換技術開発 (H13－H16 年度) で行われたバイオマスガス化－メタノール製造の実証試験プロジェクトでは、木質系バイオマスを噴流床ガス化炉に

Fig.4 A Schematic Diagram of Test Plant.

Table 2 Design and Results of the Test Plant and Plan for the Commercial Plant.

	Test plant Target	Test plant Results	Commercial plant (planned)
Scale	2 ton/day	2 ton/day	50-100 ton/day
Cold gas efficiency	65 cal%	60-67 cal%	> 75 cal%
Methanol yield	20 wt%	18-21 wt%	> 40 wt%

*Heat value of input biomass is defined as 100%

**Weight of input biomass is defined as 100%

Fig.5 Overview of the Test Plant.

において、酸素、水蒸気をガス化剤に用いてガス化し、得られたガスからメタノールを合成することを検証した。

ガス化炉は噴流床型で、これは装置の構造が極めてシンプル、状況に応じて大規模/小規模対応ができる、またガス化の際に大きなトラブルとなるタールの発生が極めて少なく、後段の触媒反応に供する純度の高い高品質のガスの製造に有利である、液体燃料製造に適したガス組成の制御が容易である、生成する気体・液体燃料へのエネルギー変換率が高い等の利点を有するためである。

本プロジェクトにおいては、ガス化のみならず、バイオマスの粉碎・供給から気体・液体燃料製造までの一貫プラントシステムの検証を行うと共に、原料収集や燃料の利用など全体システムに関するフィージビリティを検証した。Fig.4 にバイオマスガス化-メタノール合成のシステムフロー図を、Fig.5 にそのプラント写真を掲げる。

プロジェクトは、三菱重工業㈱と中部電力㈱（実証化試験担当、2 t/d 規模の実証プラントを中部電力・川越火力発電所内に建設、実バイオマスを用いてガス化遂行）と産総研（小型噴流床型ガス化装置を用いた各種バイオマスのガス化基礎特性把握を担当）の3機関で遂行された。

ガス化試験においては、スギ木部をガス化し、ガス化プラントの基本性能把握を行い、引き続き広葉樹、スギ樹皮、伐採木、ダム流木、建築廃材の計6種についてガス化試験

及びメタノール合成試験を実施した。スギ木部では、ガス化-メタノール合成を一貫して行い、試験プラントとしての重量収率目標である20%以上（dry wt base）とエネルギー回収率60%以上を達成した。（商業化時の100 t/dのスケールにおいて、45-50%重量収率とエネルギー回収率70%以上に相当。）そのほかの原料種についても、原料種の性状に応じて、粉碎、搬送、ガス化特性などが変化したものの、おおむね良好にガス化-メタノール合成を行うことができた。本ガス化では、原料の部分酸化により発生する熱でガス化エネルギーを賄うが、2 t/d という本プラント規模は、スケールが小さいためガス化炉での熱損失割合が大きく、エネルギー自立型プロセスとしての下限である。実用規模（100 t/d 相当以上）までスケールアップすれば熱損失割合は減少し、収率は向上する見込みである。（Table 2 参照）

本プロジェクトは、バイオマスの前処理（乾燥、粉碎等）・供給・ガス化・ガス精製・ガス組成調整・メタノール合成までの一貫したシステムで、安定な連続運転に成功した例としては、世界初のものである。そのほかの原料種についても、原料種の性状に応じて、粉碎、搬送、ガス化特性などが変化したものの、おおむね良好にガス化-メタノール合成を行うことができた。試験プラントの運転はH16年度で終了したが、更なる高効率化を図るため、その後別NEDOバイオマスプロジェクトにて、ガス化副生チャー、タールのリサイクル技術、生成ガスの精密精製等の研究も行った。（このうち、バイオジェット燃料については後述）Fig.6 に、チャーリサイクルシステムを利用したタールと微量成分精製のプロセス概要を示す。¹³⁾

メタノール合成に供したガス中の不純物は、

NH_3 < 0.5 ppm、 HCN < 0.1 ppm、

H_2S < 1 ppm、 COS < 1 ppm とメタノール合成に十分な純度を有していた。

試験プラントと連携する形で、小型噴流床型ガス化装置（Fig.7 左側部写真）を産総研内に製作し¹⁴⁾、これを用いて、同じくスギ木部をガス化し、ガス化の最適反応条件（水蒸

Fig.6 Char Recycle System and Continuous Tar Absorber Combined Biomass Feeding Devices.

Fig.8 Gasification of EFB and Bagasse.

Fig.7 Left: A Small-scale Entrained-flow Type Gasifier at AIST, Right: Gasification of Japanese Cedar Wood using the Lab-scale Gasifier.

気や酸素のガス化剤比、温度、滞留時間）の探索を行った。
Fig.7の右側に、スギ木部のガス化結果例を示す。

ガス化率は98%（炭素換算）と良好で、副生成物（タール、固体残渣）は極めて少なかった。

生成ガス組成は、CO、CH₄、CO₂、H₂が主であり、添加ガス化剤量を制御することにより後段の液体燃料製造に適した組成のガスが得られることがわかった。¹⁵⁾（本件では、メタノールをターゲットにしていたため、[H₂]/[CO] = 2-2.2を狙ったが、[H₂]/[CO] = 1-3.5の範囲に調整可能）実験で示されたガス化条件下で、種々の木質系、草本系、廃棄物系など20数種にわたるバイオマスについてガス化を行った。^{16),17)}ガス化結果の一例として、EFB（Empty Fruits Bunch オイルパーム果実をとった後に空房残渣）とバガス（サトウキビ搾汁後の残渣）のガス化結果を Fig.8 に示す。¹⁸⁾

同じ「草本類バイオマス残渣（農業廃棄物）」に分類される EFB とバガスであるが、カリウム含有量の高い EFB は水のみ添加でもガス化がきわめて良好に進行し、水素比'（[H₂]/[CO] 比）も高いのに対し、バガスはガス化剤が水の場合、ガス化率90%程度であるが、酸素を添加するとガス化率が向上する（99%以上）等、原料によるガス化特性の違いが伺える。

大まかにみると、木質系バイオマスについては、水蒸気のみをガス化剤に用いても良好にガス化が進行すること、草本系バイオマス、キノコ廃菌床やダム流木などの廃棄物

系バイオマスは、含有灰分の種類や含有率、リグニン含有量により、ガス化結果がスギ木部より良くなる場合も、悪くなる場合もあるが、その特性を把握してガス化を行えば、対応可能なことが分かった。実際のガス化においては、バイオマス原料特性に応じてガス化条件を最適化することが必要である。

4.2 バイオマスガス化－BTL（FT 軽油）製造

産総研と三菱重工業(株)は、NEDO の先導研究プロジェクトにおいて、木質系バイオマスを噴流床ガス化炉でガス化し、得られたガスを精製し、FT 反応を行い、BTL を製造する一貫システムの構築と各要素技術の開発を行った。（H18－21 年度）

4.3 バイオマスガス化－BTL（バイオジェット燃料）製造・次世代航空燃料に関する動向と取り組み

航空業界では CO₂ 削減の動きが世界的に広がっており、ICAO（国際民間航空機関）や IATA（国際航空運送協会）が 2020 年、2050 年をターゲットに CO₂ 削減目標を策定、CO₂ 削減の主な手段として、バイオ燃料への転換を挙げている。日本でもこれらの世界的な取り組みに呼応し、「次世代航空燃料イニシアティブ」（東大主体、H26 年 4 月発足）¹⁹⁾、「2020 年に向けたバイオジェット燃料導入道筋検討会」（経済産業省主体、H27 年 3 月発足）²⁰⁾ などの WG や検討会が立ち上げられた。平成 27 年 11 月 11 日、国産の航空機：MRJ（三菱・リージョナル・ジェット）が初飛行を成功させたこともあり²¹⁾、2020 年オリンピックイヤーを一つの契機に、国産バイオジェット燃料製造、導入の本格化を検討している。

その流れを受け、H24 年度より NEDO 次世代技術開発にて、三菱重工業を中心とするメンバーが、前述の FT 軽油製造研究で得られた知見をもとに、新しい枠組み（三菱重工業、富山大学、JX 日鉱日石、クラリアント触媒、産総研）で、バイオマスガス化－ジェット燃料製造の研究を遂行している。Fig.9 にガス化－ジェット燃料製造のプロセス概要を、

Fig.9 Process Schematic of Gasification-Bio Jet Fuel Synthesis.

Fig.10 に、MHI 総合研究所長崎支所に建設し、現在稼働中のパイロットプラントの写真を掲げる。

Fig.10 Pilot Plant in MHI Nagasaki.

5. 終わりに

本稿では、バイオマスガス化-BTL（液体燃料）製造技術の現状を紹介した。バイオ液体燃料の中でも、ガス化-BTL は、2020 年-2030 年以降は、コストの面からも既存のバイオ燃料と競合でき、実用化のレベルに達すると目されている。後段に高温高压の触媒合成システムを組み込むガス化-BTL 製造システムは、大規模化の困難なバイオマス単独では成立する場所が限定されるが、ガス化して得られるガスは、ガス組成調整/精密精製後は石炭や天然ガスをガス化/改質して得られるガスと同じであり、これらのガス化や改質と連携しながら（より大規模の石炭や天然ガス化/改質で発生する排熱、廃水を利用しながら）システムを構築することも一考かと思われる。一方、バイオマスの実用化にあたっては、技術開発の重要性もさることながら、上流：原料調達と下流：製造したエネルギーの供給のための社会システムと法令の整備が大きな鍵となっている。今後、これらの問題とリンクしながら、バイオマスからの液体燃料製造の開発が進められていくこととなる。

謝 辞

本バイオマスガス化-液体燃料製造の研究は、NEDO バイオマス研究プロジェクトの下で行われた。ここに感謝の意を表す。

引用文献

- 1) FIT については、資源エネルギー庁 HP に概要あり。「再生可能エネルギー固定価格買取制度ガイドブック、2015（平成 27）年度版」、資源エネルギー庁
- 2) 資源エネルギー庁 HP「再エネ設備認定状況（本項目は、定期的に更新されている）」
- 3) 「長期エネルギー需給見通し」平成 27 年 7 月、経済産業省
- 4) 「2030 年のエネルギー需給展望」平成 17 年 3 月、総合資源エネルギー調査会・需給部会。「新エネルギー需給の見通しと導入目標」資源エネルギー庁
- 5) エネルギー供給高度化法、平成 22 年 11 月、経済産業省

- 6) バイオマスのガス化については、いくつかの総説が出版されている。たとえば、(財)日本エネルギー学会[編]、バイオマスハンドブック、(2002)、第 2 部、2 章ガス化-常圧ガス化、3 章ガス化-加圧ガス化、4 章ガス化-間接ガス化、91-105.
- 7) IEA Bioenergy Task33, Country report-USA, R. Bain (2012).
- 8) NREL 資料を一部著者改訂
- 9) R.Stare, IEA Task 33 Workshop Meeting (Pitea, Sweden, October 18-20, 2011).
- 10) N.Dahmen, E.Hemrich, E. Dinjus, F. Weirich, Energy, Sustainability and Society, 2012,2,1,3, <http://www.energysustainasoc.com/content/2/1/3>, KIT Press release 154/2014 ("Bio-liq: Complete Process Chain is Running").
- 11) R.Rauch, "Country Report Austria", IEA Bioenergy Task 33 Meeting, (Pitea, Sweden, October, 2011).
- 12) 石井弘実、武野計二、一ノ瀬利光、日本エネルギー学会誌、**84** (2005) 420-425.
- 13) K. Matsumoto, K. Takeno, T. Ichinose, M. Nakanishi, T. Ogi, Proceeding of EBCE (May, 28, 2008).
- 14) 中西正和、小木知子、井上誠一、環境技術、**34** (2005) 522-527.
- 15) T.Ogi, M. Nakanishi, Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion, (CPL press, Vol.1 (2006) 620).
- 16) T.Ogi, M.Nakanishi, Proceeding of Renewable Energy 2006, (2007) 1050-1053.
- 17) T.Ogi, M.Nakanishi, Y.Fukuda, FUEL, **104** (2013) 28-35
- 18) T.Ogi, M.Nakanishi, Y.Fukuda, K.Matsumoto, J. Jpn. Inst. Energy, **90** (2011) 886-894.
- 19) 「次世代航空機燃料イニシアティブ報告書」（2015 年 7 月）、INAF <http://inaf-japan.tumblr.com/>(Last access 2015/11/25).
- 20) 「2020 年オリンピック・パラリンピック東京大会に向けたバイオジェット燃料までの道筋検討委員会（通称“道筋検討委員会”）設置趣旨について」（平成 27 年 7 月）、国土交通省・経済産業省
- 21) 2015 年 11 月 11 日の MRI 初フライト成功は、11 日、12 日の各新聞、朝日、毎日、読売、産経、日本経済にそれぞれ掲載されている。