特集「第7回日本LCA学会研究発表会からの投稿」

研究論文

トラックの走行時燃費を考慮したBTL燃料のLCA

渡辺 佑太郎・佐藤 由雄・川野 大輔・小井土 賢二・堂脇 清志

A Life Cycle Assessment of the Biomass-to-Liquid Considering the Fuel Consumption of a Truck

Yutaro WATANABE, Yoshio SATO, Daisuke KAWANO, Kenji KOIDO and Kiyoshi DOWAKI

Synopsis: In this paper, we focused on BTL (Biomass-to-Liquid) fuel for trucks which is synthesized from woody biomass feedstock, and discussed the alternative potential of BTL for the purpose of mitigation of CO₂ emission in a transportation sector. Here, we estimated the specific CO₂ emission of BTL fuel and the energy intensity of BTL production system on basis of "Well-to-Wheel" concept, so-called LCA methodology. So far, there are some examples of the life cycle inventory in the transportation sector. However, many of those are based on the literature review. Based on the results of basic experiments, demo-plant operation and test-run of truck, the data of the energy production phase ("Well-to-Tank") and the fuel consumption of target truck ("Tank-to-Wheel"), which is extremely important, were used in our estimation. Here, in order to examine the possibility of low-emission fuel promotion as alternative diesel, we focused on following four Bio-fuels; Bio-H₂, Bio-DME (Di-Methyl Ether), Bio-MeOH, and Bio-FTD (Fischer-Tropsch Diesel). Considering the energy density of biomass feedstock in the domestic area, we selected BLUE Tower gasification process (BT process, standard plant scale: 15 t/d) which will be close to the practice stage. Also, the characteristic of syngas through BT process has the concentration ratio of H₂:CO=2:1, which would be suitable for synthesizing BTL fuels. Through our life cycle stages, we estimated CO₂ emission [g-CO₂/km] in 4-ton trucks case. The performance data such as fuel consumption was measured in the driving test on JE05 mode which is based on the change of speed in urban area, adopted as the official mode to measure exhaust gas emissions and fuel consumption of a heavy duty car on a chassis dynamometer in Japan. Note that the fuel consumption data of H₂ and MeOH trucks were assumed due to the results of past, present and/or overseas R&D activities. Compared with the CO₂ emission of conventional fuel (Diesel: 443.43 g-CO₂/km), the mitigation benefit was obtained under the minimum emissions conditions (i.e. H₂: 266.53 g-CO₂/km, MeOH: 391.95 g-CO₂/km, DME: 274.72 g-CO₂/km, FTD: 291.28 g-CO₂/km).

Keywords: Biomass-to-liquid (BTL); blue tower; JE05 mode; life cycle assessment (LCA)

1. はじめに

1.1 運輸部門におけるCO₂排出量の現状とバイオマスエネルギーの利用

将来の持続可能なエネルギーシステムの実現のため、我が国ではCO₂削減策の1つとしてバイオマスエネルギーの利用が推進されている。バイオマス・ニッポン総合戦略が閣議決定されて以降、国産バイオ燃料の導入に向けた研究

開発やバイオマスタウン構築が本格化するなど、全国各地でバイオマス資源の利活用のための取り組みがなされている¹⁾。また、我が国はエネルギー資源に乏しく、エネルギー安全保障の面からエネルギー供給源の多様化を図る必要があると考えられている。温暖湿潤な気候である我が国において、豊富に存在するバイオマス資源の利用は、環境面だけでなくエネルギー安全保障の面からも有効な手段である

渡辺 佑太郎／東京理科大学大学院 理工学研究科 経営工学専攻／〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641
佐藤 由雄・川野 大輔／交通安全環境研究所 環境研究領域／〒182-0012 東京都調布市深大寺東町 7-42-27
小井土 賢二・堂脇 清志／東京理科大学 理工学部 経営工学科／〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

Yutaro WATANABE / Department of Industrial Administration, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo University of Science / 2641 Yamazaki, Noda, Chiba 278-8510
Yoshio SATO, Daisuke KAWANO / Environmental Research Department, National Traffic Safety and Environment Laboratory / 7-42-27 Jindaiji-higashimachi, Chofu, Tokyo 182-0012
Kenji KOIDO, Kiyoshi DOWAKI / Department of Industrial Administration, Faculty of Science and Engineering, Tokyo University of Science / 2641 Yamazaki, Noda, Chiba 278-8510

と言えよう。さらに、今般の東日本大震災や原発事故を受け、温室効果ガス削減目標の達成のみならず、地域資源を利用した自立・分散型エネルギーシステムの構築が課題となっている²⁾。

このように温室効果ガス削減の取り組みが進められる中、近年の日本のCO₂排出量に目を向けると、京都議定書で定められた基準年の1990年度の総排出量と比べ、2010年度の総排出量は殆ど削減されておらず、わずか0.3%の減少に留まっている³⁾。特に、運輸部門のCO₂排出量は2001年をピークに減少し続けているものの、2010年度においては総排出量の19.5%を占めており、さらなる削減が必要であるとされている。また、自家用乗用車部門では、近年ハイブリッド車や電気自動車が市販されており、CO₂削減技術が市場に導入され始めているが、自動車に搭載される電池重量が輸送トン数の減少を招くことから⁴⁾、貨物輸送に使われるトラックなどの大型車のEV化は難しいと考えられている。そのため、重量車の排出ガス削減に向けては低炭素燃料の導入が有望視されており、バイオマスを原料とする輸送用燃料の導入に向けた研究開発が行われており、輸送用バイオ燃料については、エネルギー基本計画の中で、2020年に全国のカソリンの3%相当以上の導入を目指すとされている⁵⁾。また、バイオマス活用推進基本計画において、バイオマスを原料とした液体燃料であるBiomass-to-Liquid (BTL) などの次世代バイオ燃料の技術開発の推進や、バイオマスガス化を経由して得られるメタノール（以下、MeOH）などのBTLの開発の推進が明記され⁶⁾、加えて、現在Dieselトラックに使用されている軽油に代わるバイオ燃料として、ジメチルエーテル (Di-Methyl Ether: DME) やFT軽油 (Fischer-Tropsch Diesel: FTD) などが注目されている⁷⁾。これらの燃料は輸送用燃料として化石燃料に代替することができ、専用車両の研究開発も進められてきている⁸⁾。例えば、DMEはセタン価が55-60と高く（軽油は40-55）⁹⁾、粒子状物質 (Particulate Matter: PM) を排出しないという点から、軽油代替として有望であると考えられ、これまでDME車の開発や走行試験が行われてきた^{8, 10)}。なお、直鎖パラフィンであるFT合成によるFTDは、Gas-to-Liquid (GTL) 技術の1つであり、合成ガスから製造することが可能で、軽油に代わる燃料として注目が集まっている^{11, 12, 13)}。

このような運輸部門における代替燃料の導入施策、特に、トラックに対する代替燃料の開発状況を勘案し、筆者らは、より効果的な温暖化対策への貢献を目指し、これらの燃料に対するLCA視点によるCO₂削減効果の包括的な検討を行うこととした。

1.2 これまでのバイオ燃料のLCAにおける課題

これらのバイオマスを原料とする燃料に関するCO₂削減効果の評価では、カーボンニュートラルの考え方により燃焼時にCO₂を発生しないとされ評価されてきている¹⁴⁾。しかしながら、バイオ燃料のライフサイクル全体におけるCO₂排出量は各サブシステムでの化石エネルギーの間接あるいは直接の投入があるためゼロとはならない。また、製造される燃料種により、その効率も異なるため、特に、バイオ燃料の導入ポテンシャルを議論する場合には、消費段階での利用状況を含めた評価が必要となろう。なお、さらに上流側でのバイオマス原料の種類によって、燃料製造の性能に関する部分についても考慮する必要があるが、本研究においては、まずは、利用段階までを考慮したライフサイクルにおいて、現状で想定され得る燃料がどの程度の導入ポテンシャルがあるのかを主な目的としているため、この部分については、原料コストや資源賦存量などを含め今後の検討課題としたい。従って、バイオ燃料に対するLCAによるCO₂削減効果の分析においては、原料収集からエネルギー変換プロセスまでのバイオ燃料製造段階とバイオ燃料使用段階の双方のシステムを含めたライフサイクル全体にわたる総合的な評価が必要であることになる。なお、国内で製造されるバイオ燃料のLCAの重要性は、エネルギー基本計画でも明記されている⁵⁾。

これまで、バイオ燃料の製造時及び使用時を含めたLCAに関する研究報告はいくつか行われ^{9, 15)}、バイオ燃料導入時の環境指標として使用されている。例えば、先に挙げたBTLと同様に、トラックの代替燃料として期待されている食物残渣などを原料とするBio-Diesel Fuel (BDF) は既に実用化されており、これに対する燃料の製造時及び使用時を含めた研究事例についてもいくつかある^{9, 16)}。

他方、今後の導入が期待されている木質系バイオマス資源によるエネルギー化は、現在研究開発が進められているものの未だ実用化には至っていないため、将来の導入ポテンシャルを含めたLCAの検討事例は少ない。例えば、バイオマスガス化システムによるバイオ燃料の製造が有望視されているが、具体的な製造プロセスを勘案し、生産された燃料に対し自動車の実走行燃費を適用し走行段階まで考慮したバイオ燃料のCO₂排出量についての詳細な分析事例はない。そのため、これまでの報告例としては、燃料製造効率や自動車の走行時燃費などの文献値や推算値をもとに、当該バイオ燃料のライフサイクルにおける温室効果ガス排出量を算出しており、国内でのバイオ燃料の導入を目標とした場合に、それらの推算値が適合するかは不明である。

また、現在までに、国内に導入されたバイオ燃料の原料収集から製造、使用時までに至るライフサイクル全体を含

めた包括的なLCAによる分析結果及びその結果をフィードバックさせたシステム提案に関する包括的な研究結果も少ないため、より具体的な実データによる技術面及び環境面を考慮した包括的な評価が必要となろう。

1.3 バイオ燃料製造プロセスの評価

木質系バイオマスを原料としたバイオ燃料の導入に当たり、バイオマス原料の収集・運搬時に多くのエネルギーを必要とする点は、関連する先行研究や報告書などで既に指摘されてきている課題であり、広範囲に分布する原料の輸送コストを低減する目的から、これまで様々な検討がされてきた^{17, 18)}。また、バイオマスエネルギー導入ガイドブックでは、木質バイオマスや林地残材の輸送距離の削減のため、バイオマスの発生地点から近距離にバイオマス施設を設置することも提案されている¹⁹⁾。さらに、燃料製造プラントを小規模分散化することにより、原料の収集範囲を狭い範囲に限定することが可能となると同時に、燃料供給コストの低減につながる可能性がある。

これに対し、これまでの先行研究から、エネルギー製造時のエネルギー投入量を抑えるには大規模化によるエネルギー効率の向上によるメリットがあることが分かっている^{20, 21)}。しかしながら、自動車用の燃料供給施設を考えた場合には、大規模化し数か所から各燃料供給ステーションに輸送するよりも、燃料供給コストの低減や自動車の航続距離の制約から、より高効率な小規模分散型の製造プラントの導入を目指すことが重要となろう。

次に、国内で導入可能なバイオ燃料製造システムの関連研究については、筆者らにより、原料の輸送距離の不確実性を考慮したバイオマスエネルギーシステムのLCA分析が行われている^{17, 18)}。その研究の中で、国内のバイオマス賦存状況に対応する小規模分散型のバイオ燃料合成システムのひとつであるBlue Tower (以下、BT) ガス化プロセスを対象とした研究を行っている²²⁾。これまでの成果を発展させ、BTプロセスによる燃料合成システムについては、ガス化実験やLCAによる環境性評価を含め多くの研究成果が報告されている^{16, 23, 24)}。特に、BTガス化プロセスによるBio-H₂製造プラントは、実証プラントでの数100時間の連続運転の達成や既に商用化に向けた実証運転研究を経て²³⁾、技術的に信頼性の高いものとなってきている。また、当該システムの今後の具体的な導入方策として、下水汚泥を原料としたFCV用のH₂燃料製造についての研究開発も着手されてきている。さらに、当該プラントによるBTL製造ポテンシャルについては、合成ガスのH₂/COが約2であるとの特徴があることから、MeOHやDMEの合成に比較的有利となり、当該燃料に対する製造システムも提案されている^{16, 17)}。これらのBTLに加え、Bio-H₂製造

プロセスについても、FCVなどの燃料供給をイメージし、原料収集段階から輸送、乾燥及びエネルギー変換までの環境性評価はなされており、国内でのバイオ燃料製造システムについては一定の評価は行われていると言えよう。

1.4 バイオ燃料トラックの実走行燃費評価

これまでの筆者らの研究成果においては、主に、トラック燃料を対象に、Well-to-Tank (WtT) ベースでの検討を行ってきたが、今後のバイオ燃料に対するLCAにおいては、実証レベルの製造プロセスを扱う以上、走行段階の評価、すなわち、Tank-to-Wheel (TtW) の評価も必要であり、その意味から、トラックの実際の走行時を対象とするべきであろう。特に、国内を走行するトラックへ適用した際の環境性能評価には、排ガス規制に伴う燃費への影響が大きいため、排ガス規制の基準を満たした実走行モードの燃費データによる評価が必要となり、本研究では、最新の排ガス測定モードであるJE05モード走行時の試験データを用いて分析を行うこととした。ここで、JE05モードとは、渋滞路や都市高速道路の走行を含む重量車の都市内走行を模擬した走行モードで、新長期規制から採用されたものである²⁵⁾。この走行試験モードの作成にあたっては、都市部を中心に多数の実車データが取り入れられ、貨物トラックを含む大型車の実際の走行時に見られる様々な速度・加速度の分布を反映しているため、このモードにより評価された燃費データを用いて分析を行うこととした。

1.5 本研究の目的

以上の背景から、今後の低炭素燃料の開発について1つのシナリオを示唆することを目的に、本研究では、H₂やBTLを代替燃料として導入する場合のWtTベースでのCO₂削減対策を示唆するだけでなく、TtWベースでの導入可能性やCO₂削減対策を評価することとした。今回、分析対象としたバイオ燃料はH₂、MeOH、DME、FTDの4種類と比較のために市販軽油 (Diesel) を想定し、いずれも4tトラック (積載率50%を想定) に供給を想定し、さらに将来の燃料供給体制を勘案して、小規模分散型対応のBTプロセスにより生成した合成ガスからの製造を想定した。これらのバイオ燃料の選定理由としては、いずれもこれまでの実証データの検証から、BTプロセスによって製造可能であること、将来の輸送用燃料として普及する可能性があることが挙げられる。なお、供給原料としては、国内に広く分布する木質バイオマスの利用を前提とし、まずは、スギ材をベースにしたデータを利用することとした。また、排ガス及び燃費データについては、市販軽油、DME及びFTDを燃料とする場合には、JE05モード走行試験結果を反映させて分析を行った^{10, 11)}。一方、H₂及び

MeOHについては、現在、これらの燃料で駆動するトラックが実用化されていないため、過去の研究事例や研究開発の状況を勘案し、当該燃料の燃費を推定したデータを用いていることに注意されたい。

これらの評価を通して、原料の収集、エネルギー変換及びエネルギー利用までのLCAについて、より現実に近いデータを用いてCO₂排出量やエネルギー収支比の評価を行うことの意義は大きく、実用面を勘案した一連のシステムの中で、どのサブプロセスにおいてCO₂負荷が大きくなるのか、あるいは、全体のエネルギー効率を向上させるための改善案はないかを提示することができ、さらに、全体の結果から、燃料側だけの対策だけでなく、その燃料を利用する側の対策の必要性を包括的に示唆することが可能となり、今後の当該研究の成果がバイオ燃料導入のための1つのシナリオを示すことになるだろう。

2. LCAの条件設定

2.1 ケース設定

初めに、燃料製造のシステムについては、スギ材を原料とする小規模分散型のガス化プロセスにはBlue Towerガス化プロセス（BTプロセス）を想定した。この選定理由としては、当該プロセスの実証炉ベースにおいては、Tarによるトラブルが少なく、ガス化炉運転時にトラブルが発生しにくいと考えられるためである²³⁾。BTプロセスにおいては、バイオマスの熱分解及び熱分解ガスの改質に必要な熱動力を、熱分解で発生するCharや、合成ガスからの燃料製造後に発生するオフガスの燃焼によって賄うため、プロセスの外部からの熱動力の投入は無い。また、ガス化後、合成ガスからバイオ燃料の燃料合成を行うが、当該プロセス内で必要となる熱動力を全てプロセス内部で賄える

ように、合成ガスの持つ熱の一部で熱動力を補うようなシステムを設計した。なお、プラント規模については、商用プラントの規模や国内の木質バイオマスの賦存状況などを勘案し、12t-dry/dの規模によるオンサイトでの燃料製造を基準として評価した。また、橋本らの分析によれば、この規模のプラントでは、プラントから50km圏内で必要となるバイオマス量を確保できることから、原料輸送距離を5-50kmと仮定し²⁶⁾、さらに、原料の含水率のばらつきにより原料処理量に変化することが想定されることから、初期含水率を20-50%と仮定した。

2.2 システム境界

ここで、Figure 1に本研究で行うLCAのシステム境界を示す。今回は、バイオマスの収集後、チップ化、原料輸送、乾燥及び製造までをWell-to-Tank、さらに、燃料を使用する走行段階をTank-to-Wheelと定義し、Well-to-Wheelにわたるバイオ燃料のライフサイクルを想定している。それぞれの段階で原料の処理や輸送、燃料合成のために使用するエネルギーが投入され、エネルギー消費に伴いCO₂が排出される。なお、投入されるエネルギーは軽油及び商用電力を想定しており、Table 1には各エネルギーのCO₂排出原単位を示した^{27, 28)}。

本研究では、バイオ燃料製造時のエネルギー収支比EI [MJ/MJ-Fuel] を算出しているが、投入エネルギーは全て一次エネルギー換算するため、電力使用によるエネルギー消費量は、国内の一般電力の発電効率42%で割り戻した1次エネルギー換算値を用いている²⁸⁾。また、Well-to-Tankにおいては、バイオ燃料1MJ製造時のCO₂排出量CO₂_Prod [g-CO₂/MJ-Fuel] を、Tank-to-Wheel及びWell-to-Wheelにおいては、1km走行時のCO₂排出量CO₂_

Figure 1. System Boundary

Table 1. Data of Input Energy

Fuel	Unit	Energy (LHV) [MJ]	CO ₂ [kg-CO ₂]	Note
Electricity	[kWh]	-	0.385	Generating Efficiency: 42.0%
Diesel oil	[L]	35.5	2.74	Chipping, Transportation
Biomass	[kg]	13.233	0	Feedstock

Run [g-CO₂/km] をそれぞれ算出している。ここで、エネルギー収支比及びCO₂排出量は、次式により定義される。

$$EI = \frac{E_Cons}{E_Prod} \quad (1)$$

$$CO_2_Prod = \frac{CO_2_Emit}{E_Prod} \quad (2)$$

$$CO_2_Run = \frac{CO_2_Prod}{FC} \quad (3)$$

但し、E_Const: Well-to-Tankにおけるエネルギー消費量 [MJ/h]、E_Prod: 製造されたバイオ燃料のエネルギー量 [MJ-Fuel/h]、CO₂_Emit: Well-to-TankにおけるCO₂排出量 [g-CO₂/h]、FC: バイオ燃料自動車の走行燃費 [km/MJ-Fuel] である。

3. 各プロセスにおける評価方法

3.1 原料輸送・前処理

エネルギー変換前の原料輸送・前処理プロセスでは、これまでの研究成果に従い、次のように条件設定した^{16, 17, 24)}。

まず、スギ材のチップ化におけるエネルギー消費量の原単位は、電力13.6 kWh/t-material、軽油1.23 L/t-materialとし、含水率による原単位の変化は無いものと仮定して算出した。

次に、チップ化された原料は、製造プラントまで10 t Dieselトラック（荷台容積：24.7 m³）で輸送されるものとした。このとき、まず、原料のかさ比重0.14t/m³（気乾状態：含水率15%）として、運搬時含水率から比重を評価し、トラックの荷台に搭載できるチップの体積からその重量を評価し、さらに最大積載量に対する割合（積載率）を10tトラックに対するエネルギー原単位を改良トンキロ法により評価した^{16, 29)}。

ガス化炉投入前の乾燥プロセスでは、原料の含水率を20%まで下げるため、軽油を燃料とする蒸気ボイラ（ボイラ効率：80%）を使用し、ボイラの動力となる電力原単位は0.195kWh/t-waterとした。さらに、このとき燃料合成時に余剰となるオフガスを乾燥プロセスで使用することを想定した。このため、オフガスの熱量だけで乾燥動力を賄える場合は乾燥プロセスでのエネルギー消費量がゼロである。

さらに、木質バイオマスは、初期含水率やプラントからの輸送距離が一定ではないため、前処理を含めた燃料製造に必要なエネルギー消費量を検討する場合には、不確実性を考慮しなければならない。特に、本研究では、原料のチップ化及び乾燥プロセスで必要となるエネルギーは、原料の初期含水率によって変化し、原料輸送プロセスで必要となるエネルギーは輸送距離と原料の初期含水率によって変化することが想定されるため、すなわち、最終的なLCAによる指標に影響を及ぼすため、これらの不確実性を留意し、本研究では輸送距離を5-50km及び初期含水率を20-50%として、これらの2つの要因が独立に一樣分布確率で変化するものとして、モンテカルロ法により輸送距離及び含水率の最小値、最大値及び平均値を算出することとした^{16, 20)}。なお、計算回数は10,000回とし、5%有意として求めた。

3.2 エネルギー変換プロセス

(1) Blue Towerガス化プロセス

本研究では、木質バイオマスのガス化プロセスとしてBTプロセスを想定している。BTプロセスについてはこれまで多くの研究がなされており、ガス化炉の仕様については亀山らによる研究結果を参照されたい^{16, 23, 24)}。最近では、2011年に福岡県大牟田市で商用プラントの実証運転研究が開始され、技術的にも信頼性の高いものとなってきた^{21, 22)}。今回の分析では、当該プロセスの設計に用いられているプロセスシミュレーターを利用することができることから、実用的なバイオ燃料製造プロセスの設計が可能である。そのため、Well-to-Tankにおいてはバイオ燃料製造プラントの実際の導入を見据えた検討を行えるであろう。なお、Table 2には、今回検討したバイオ燃料製造システムについての運転条件及び生成効率などの詳細なデータを示した。

次に、生成した合成ガスからバイオ燃料を合成する。今回対象とするバイオ燃料とその選定理由は先に述べた通りであり、全てBTプロセスにより製造可能である。なお、それぞれの合成法については、以下に示す通りである。

(2) Bio-H₂製造

BTプロセスで製造される合成ガスは、高濃度のH₂が得

Table 2. Performance Data of Bio-Fuel Production System

Process		Unit	H ₂	MeOH	DME	FTD
BT Process Gasification	Scale	[t-dry/d]	12	12	12	12
	Feed Biomass	[kg/h]	635.9	635.9	635.9	635.9
		[MJ/h]	8415.3	8415.3	8415.3	8415.3
	Cold gas efficiency	[LHV -%]	59.9	59.9	59.9	59.9
	Auxiliary Power*	[kW]	247.8	370.3	370.1	369.8
Production System		[Nm ³ /h]	305.0	-	-	-
	Production	[L/h]	-	196.9	169.7	72.3
		[MJ/h]	3290.2	3293.5	3257.4	3380.4
	Temperature	[°C]	40	170	190	250
	Pressure	[MPaA]	0.8	3.0	3.0	5.1
	Synthesis	[LHV -%]	39.1	39.1	38.8	39.5
	Efficiency					

*Note: Auxiliary power is corresponding to the conventional electricity which is consumed by PSA and refinery equipment in the energy plant.

られるという特徴を持つ。この合成ガスからPSA (Pressure Swing Absorption: 圧力スイング吸着)により4N-H₂(純度: 99.99%)を回収する。なお、PSA装置の運転圧力は0.8MPaAとしたが、Table 2に所内動力を示す通り、圧縮動力が所内動力の74.2%と大半を占める結果となった。

これから、この精製プロセスを経て得られたH₂の製造量を用いてH₂製造時のエネルギー収支比を算出した。

一方、使用側では、自動車充填時に液化、圧縮及びH₂担体となる有機物への転換などの方法が考えられているが、いずれも多くエネルギーを必要とすることから、H₂の運搬・貯蔵段階に課題が残されている。また、自動車のH₂エンジンは、Dieselトラックと同等の出力性能やエネルギー効率を目指し、現在開発段階である³⁰⁾。本研究では、文献をもとに35MPaの圧縮H₂ガスをトラックに充填するものとした¹⁵⁾。

(3) Bio-MeOH 製造

MeOH合成反応では、理想的な合成ガス中のH₂/CO比は2である。このときの反応式は

で表される³¹⁾。合成ガスからのMeOH合成プロセスは、主に圧縮工程と合成工程により構成される。一般的に、合成ガスからのMeOH合成に最適な反応条件は反応温度200-300℃、反応圧力8.0-10.0MPaであるが、MeOH合成時の動力低減のため、本研究では170℃、3MPaAの下で単段でのMeOH合成を想定した。合成後のガス中にはMeOHと微量の水分が含まれるため、フラッシュ蒸留により

MeOHと水の分離を行った。なお、MeOHは常温常圧で液体であるため、トラック充填時に多くの動力が必要な冷却や圧縮などの特別な操作を必要としないことから、導入への障壁が少ない。さらに、一般的には高温高压条件下でMeOH合成を行うが、所内動力の大部分を占める圧縮動力低減のためには低圧下での合成が必要である。この課題に対して、MeOHの低圧多段合成実験により、合成時のエネルギー投入を一定程度抑えられるとの成果を得られている²¹⁾。そのため、燃料合成時の技術的な障壁は少ないと考えられるが、一方で、かつて我が国においても、NO_x対策としてMeOHトラックの導入が考えられていたが^{32, 33)}、現在は、その開発が行われておらず、今後、専用エンジンの開発・改良が必要であり、エンドユーザーに對しいかに導入メリットを示すかが課題である。

(4) Bio-DME 製造

工業的なDME合成法としては、間接法と直接法の2種類がある。間接法とは、合成ガスから一旦MeOHを合成した後、MeOH脱水反応によりDMEを得る方法である。反応式は、

で表される³¹⁾。

今回のケースでは一つの反応器でDME合成を行うことを想定しているため、直接法に分類される。BTプロセスで生成した合成ガスは各バイオ燃料の合成に適したH₂/CO比に調整されており、本研究で想定するDME合成に適したH₂/CO比は2である。このとき、反応器内で起こる

化学反応は、(4) 及び (5) 式をまとめた (6) 式となる。

本研究では、これまでに行われたBTプロセスからのDME合成についての研究結果をもとに、190℃、3.0MPaAの反応条件の下でDME合成を想定した^{16, 20)}。ここで、熱効率やユーティリティ使用量、DME製造量を算出し、DME製造時のエネルギー収支比及びCO₂排出量を算出した。なお、(6) 式の反応が進むと、DME製造後はDMEとH₂Oの混合気体が得られる。ここでは、混合気体を常温まで冷却し気液分離を行い、気体のDMEをトラック燃料として利用しやすい液体に転換するため、-25℃まで冷却を行った。製造所内で必要となる動力のうち、DME合成時の圧縮動力と冷却動力によるものが大きい。また、使用にはDMEを燃料とした専用車の導入が必要であり、MeOHトラック同様、エンドユーザーに対しに導入メリットを示すかが課題である。

(5) Bio-FTD製造

FT合成により製造されるFTDは、H₂とCOの混合ガスである合成ガスから触媒を用いて炭化水素を合成する。この反応で必要となる触媒は、Fe、Co、Ruなどがあり、また、合成反応は以下の化学反応式で示される³⁴⁾。

BTプロセスにより得られた合成ガスから、250℃、5.1MPaAにおいて、FT合成法によってFT合成油を製造する。このとき、反応器内ではC₁級からC₂₀級を超える直鎖パラフィンが生成するが、合成油の形態ではDiesel機関で使用できないことから、軽油留分と見なせるC₁₁-C₂₀級のFT合成油を蒸留により回収する必要がある。このとき、C₁-C₁₀級のFT合成油はオフガスとして扱い、C₂₀₊のFTワックスには水素化分解処理を施し、より軽質な成分へと分解する。この水素化処理によりFTDの収量を高めているものの、製造された炭化水素の全量を利用することはできない。なお、FT合成の反応条件や合成ガスからのCO転化率は藤本らの研究³⁵⁾をもとに設定し、直鎖パラフィンの連鎖成長確率は91%と仮定した³⁶⁾。また、水素化分解反応でのH₂消費量は花岡らの研究結果を用いた³⁷⁾。

水素化分解反応で必要となるH₂は、FTD製造とは別のBTプロセスを経て製造されるものとした。この場合、添加用H₂をエネルギー投入として考えるので、製造時のエネルギー収支比の算出においては、電力と同様にH₂製造時の製造効率で割り戻し、1次エネルギー換算したものを用いた。添加用H₂のCO₂排出量については、バイオ燃料によるH₂製造を想定していることから、BTプロセスを経

たH₂製造プロセスの結果を利用した。なお、製造されたFTDの性状は市販軽油と同等であることから、使用に際して専用車の開発が不要であることは使用時の利点として挙げられる。

3.3 走行時

次に、走行時の分析においては、最大積載量4tのH₂トラック、MeOHトラック、DMEトラック及びFTDトラックの4車両を対象とし、走行時のCO₂排出量を算出した。このうち、H₂トラックは、エンジンによる内燃機関搭載車と燃料電池車の2種類が考えられるが、先述のように電池重量が積載量に制限を加える可能性があることから、本研究ではH₂エンジン車での運用を想定した。

4t車の走行時のCO₂排出量及び燃費を考慮するため、重量車の都市部走行時の速度変化を反映したJE05モードによる試験結果を使用した。但し、現在、H₂トラックとMeOHトラックは市販されておらず、試験用車両の入手が困難である。さらに、JE05排出ガス試験モードでの過去の文献値や実測値なども存在しないことから、次のように燃費値を推測した。

現在のH₂とMeOHを燃料とする内燃機関の自動車は、主にOttoサイクル（火花点火）エンジンを使用している。これは、現時点ではこれらの燃料によるDieselサイクルに関しては技術的課題があるために、Ottoサイクルが採用されているためである。しかしながら、H₂やMeOHをDieselサイクルで運転する研究開発例もあり^{32, 38)}、本研究で対象としている4tトラックを想定する場合においても、温暖化対策だけでなく、NO_x対策の観点からも、Dieselサイクルによる導入ポテンシャルが期待されるところである。

これまでの研究事例については、例えば、H₂エンジンについては、国土交通省による次世代低公害車開発・実用化促進プロジェクトの中で独立行政法人交通安全研究所と東京都大学との共同で6気筒Dieselエンジンの開発を行い、その中で、JE05モードでの駆動試験を実施し、また、その燃費については、発熱量換算でDieselトラックと同等と設定している³⁸⁾。さらに、米国の環境保護庁が主体となったプロジェクトにおいては、Class 8 (15t以上) のトラックに対する発熱量換算による燃費の比較が行われている³⁹⁾。

本研究におけるH₂トラックの燃費を考える場合には、従来のDieselトラックに対して、燃料及び燃料タンクなどの重量増加による影響を考慮しなければならない。前述した米国の事例においては、Class 8のトラックにH₂エンジンを導入した場合には燃料及び燃料タンクの重量が6,500 lbs (2.9 t相当) と見積もっており、これはDiesel車の場合と比べ440%に相当するとしている。また、H₂エンジン関連の重量増加の影響により最大積載量の10%の損失があ

るとしている³⁹⁾。

以上の条件から、最大積載量及び積載率を考慮することで、日本の同クラスのトラックの燃費を改良トンキロ法で求めることができ、さらに、同じ積載量に対する燃費の比較を行うことができる。なお、改良トンキロ法による推定式は、

$$\ln y = 2.71 - 0.812 \ln(x/100) - 0.654 \ln z \quad (8)$$

で与えられ、 y : 輸送トンキロ当たり燃料使用量 [L/tkm]、 x : 積載率 [%]、 z : 最大積載量 [kg] である²⁹⁾。

次に、(8) 式を用いて、Dieselトラックの燃費を求める。ここで、Dieselトラックの最大積載量は米国の事例を参考にして23 tと仮定し、本研究で仮定している積載率50%を用いて計算した。

また、H₂トラックのエンジンの燃費は、我が国の次世代低公害車開発・実用化促進プロジェクトの中で、発熱量換算でDieselトラックと同じとしているので、結局のところ、積載量の違いによる影響がH₂トラックの燃費に影響されるということになる。すなわち、計算されたDieselトラックの燃費を用いて、積載量の違いによる補正を行うことによってH₂トラックの燃費を推算した。ここで、Dieselトラックの積載量を1とすれば、H₂トラックについては、さらに、燃料及び燃料タンクなどの重量増加分についても考慮する必要がある、1.20の積載量を輸送することとなり、トランスミッションの部分や空気抵抗などのその他の損失を無視できるとすれば、Dieselトラックの燃費の約83%程度となる。

従って、本研究においては、この燃費の違いが4tトラックにも適用できるものとして、H₂トラックの燃費をDieselトラックの85%と仮定することとした。

次に、MeOHエンジンについても、1988年の東京都による排ガス調査用の2tトラック4気筒エンジンの仕様³³⁾及び積載率及び最大積載量が燃費に及ぼす影響を考慮し以下のように決定した。

まず、従来のDieselトラック及びMeOHトラックの平均燃費は、同じ積載量のもと、それぞれ8.69km/L及び2.72km/Lである。本来ならば、このDieselトラックの燃費と改良トンキロ法の(8) 式を組み合わせることによって、これらの違いを推定することが可能であるが、現在では、排ガス規制に伴い、Dieselトラック(2tトラック)の燃費が8.69km/Lの水準に達しない。すなわち、(8) 式によれば、2tトラックのケースにおいては、ガイドラインで示されている最小積載率10%のときの条件では、その燃費は7.39km/L程度にしかならず、別の工夫が必要となる。

そこで、まず、積載率及び最大積載量が燃費に及ぼす影響を調べることにした。野田らは、重車両の実走行燃費に

関する各種影響要因のシミュレーション解析を実施しており、2t、4t及び8tトラックの空積載、半積載及び全積載の燃費の影響を調べている⁴⁰⁾。これにより、積載率50%のときの2tトラック及び本研究で対象としている4tトラックについての燃費の変化量を求めた。次に、東京都の排ガス試験で使用されたMeOHトラックの燃費は、軽負荷時の熱効率の悪さによりDieselトラックの燃費の1/3程度となるため、ここでも、MeOHとクラックの燃費をこの値により補正することとした。この結果、発熱量換算で4tトラック(積載率50%)のときの燃費は、それぞれで0.180km/MJ(Diesel)及び0.135 km/MJ(MeOH)となり、ディーゼル比で約75%となるため、本研究においては、MeOHトラックの燃費をDieselトラックの燃費の発熱量換算で75%と仮定した。なお、これまでのMeOHに関するトラックへの検討については、Ottoサイクルではあるが、米国マサチューセッツ工科大学がMeOHトラックの研究開発を実施しており、Dieselエンジンとの比較研究が行われている⁴¹⁾。

H₂トラック及びMeOHトラックについては、以上のような燃費の仮定を行ったが、これらの車種については、今後の開発状況を考慮し、なるべく早い段階でデータの更新を図りたいと考えている。

次に、DME及びFTD、さらに化石燃料との比較のため、市販軽油については、独立行政法人交通安全環境研究所により提供された市販軽油、DME、FTDを燃料とした4t車のJE05試験モード走行における排ガス測定結果^{10, 11)}を使用した。JE05モードは日本における重量車(車両総重量3.5トン超のトラック・バス)の走行実態がより反映された加減速の多いモードであり、従来のDiesel13モードよりも実際の走行状態に近いものである。この走行試験で計測された燃費データを用いることにより、走行実態をより反映した分析結果が得られるであろうと考えられる。本研究では、貨物の積載率別(空積載、半積載、定積載)に測定された試験データのうち、半積載(積載率50%)における燃費、CO₂排出量のデータを使用した。

ここで、JE05モード試験結果をTable 3に示す。この試験結果から、DMEは軽油に比べエネルギー密度は小さいもののエネルギー効率が良いことがわかる。DMEは燃焼時に有害なPMを排出せず排ガスがクリーンであることに加え、軽油代替燃料としてのポテンシャルを持っていると言えよう。また、FTDは軽油と同等の燃料性状で、軽油よりも若干エネルギー効率が良い結果であった。なお、LCAによりバイオ燃料のライフサイクル全体でのCO₂排出量を算出しているが、走行時に排出されるCO₂排出量はカーボンニュートラルを考慮しゼロカウントとした。

Table 3. Emissions and Fuel Consumption Data of Bio-Fuel Truck

Item	Unit	Diesel	H ₂	MeOH	DME	FTD
Driving mode	-	JE05	-	-	JE05	JE05
Capacity	-	50%	-	-	50%	50%
CO ₂ Emission	[g/kWh]	835.0	-	-	731.5	820.0
NO _x Emission	[g/kWh]	2.10	-	-	0.73	0.47
Fuel Consumption	[km/L]	6.60	-	-	3.48	6.36
	[km/MJ]	0.169	0.144	0.127	0.181	0.176
	[MJ/km]	5.90	6.94	7.87	5.52	5.68

* The fuel consumption of the 4t diesel truck (Canter, Mitsubishi Fuso Truck and Bus Corporation) is 8.30 km/L due to test for heavy duty vehicles.⁴⁵⁾

Figure 2. Energy Intensities for the Well-to-Tank pass

4. 分析結果

4.1 Well-to-Tankにおけるエネルギー収支比

これまで検討してきたバイオ燃料の製造プロセスをもとに、Well-to-Tankにおけるエネルギー収支比及びCO₂排出量について評価した。

まず、Figure 2にエネルギー収支比を示す。バイオ燃料のmin, max 及び aveは、原料輸送距離及び含水率に幅を持たせて最小値、最大値及び平均値を評価したことによるものである。なお、化石燃料との比較のため、軽油精製段階までのエネルギー収支比を左に併記している。また、エネルギー収支比1 MJ/MJ-Fuel となる境界を示しているが、これはバイオ燃料1MJを製造するために電力や軽油といった投入エネルギーをどれだけ消費したかを示しており、1MJを上回る場合では得られるエネルギーの方が少ないこ

とから、現状では導入が困難であることを示している。

この結果から、バイオ燃料1MJ製造時に必要となるエネルギー量は、

H₂ : 0.804 ~ 1.471 MJ/MJ-H₂

MeOH : 1.054 ~ 1.729 MJ/MJ-MeOH

DME : 1.049 ~ 1.691 MJ/MJ-DME

FTD : 1.131 ~ 1.789 MJ/MJ-FTD

となった。いずれも、軽油の製造時エネルギー収支比0.12 MJ/MJ-Dieselを大きく上回る結果であった。

4.2 Well-to-TankにおけるCO₂排出量

Well-to-TankにおけるCO₂排出量をFigure 3に示す。バイオ燃料製造時のCO₂排出量は、軽油の7.84 g-CO₂/MJ-Dieselを大きく上回った。その結果を以下に示す。

Figure 3. CO₂ Emissions for the Well-to-Tank pass Figure 4. CO₂ Emissions for the Well-to-Wheel pass

H₂ : 38.40 ~ 92.03 g-CO₂/MJ-H₂

MeOH : 51.31 ~ 106.29 g-CO₂/MJ-MeOH

DME : 49.79 ~ 102.96 g-CO₂/MJ-DME

FTD : 51.00 ~ 105.18 g-CO₂/MJ-FTD

こちらも軽油と比較して排出量が多く、従来の研究⁹⁾と同じように製造時にCO₂を多く排出する結果となった。

4.3 Well-to-WheelにおけるCO₂排出量

これまでのWell-to-Tankの分析結果、及び推定値を含むバイオ燃料の燃費値を用いて、バイオ燃料を使用して1km走行した場合、CO₂がどれだけ排出されるかを評価した (Figure 4参照)。

まず、基準となるDieselトラック走行時のCO₂排出量をFigure 4に併記した。化石燃料は走行時にCO₂を排出することから、ライフサイクル全体では443.43 g-CO₂/MJ-Dieselであった。

次に、バイオ燃料のWell-to-WheelにおけるCO₂排出量を、Well-to-TankにおけるCO₂排出量 [g-CO₂/MJ-Fuel] にそれぞれの走行時燃費 [MJ-Fuel/km] を掛けることで算出した。その結果を以下に示す。

H₂ : 266.53 ~ 641.33 g-CO₂/km

MeOH : 391.95 ~ 812.20 g-CO₂/km

DME : 274.72 ~ 568.03 g-CO₂/km

FTD : 291.28 ~ 600.77 g-CO₂/km

前章の走行時 (Tank-to-Wheel) 分析において、Dieselトラックと比べエンジンの熱効率が良く、1km走行当たりに必要な熱量が少ないDME及びFTDトラックのケースでは、CO₂削減効果が高い結果となった。最大値をとる場合は、DMEのケースで軽油の1.28倍、FTDのケースでは1.36倍のCO₂排出量であったものの、最小値をとる場合はDMEでは38.0%, FTDでは34.3%のCO₂削減効果を得た。この結果から、実測されているJE05モード燃費データを

用いた今回の分析において、DME及びFTDはエネルギー製造条件によっては、大きなCO₂削減効果が得られると考えられる。また、H₂トラックのケースで最小値をとる場合には39.9%のCO₂削減効果を得ることができた。なお、H₂トラックの燃費については、前述したように、推定値であることに注意されたい。

一方、H₂トラックのケースでは平均で3.7%程度のCO₂削減効果となり、条件によってはCO₂排出量を増加させてしまう結果となった。MeOHトラックのケースでは、CO₂排出量が最小の場合では11.6%の削減効果を得られたものの、最大では83.2%の排出量増加となるなど、低炭素燃料としてのポテンシャルがあるとはいえない結果となった。但し、今回の分析においてH₂及びMeOHトラックの実走行燃費が推定値であることから、燃費が改善される可能性が十分にあることに留意する必要がある。さらに、原料の不確実性による影響が大きく、最も影響の小さいDMEのケースでも293.31 g-CO₂/MJ-DME、最も影響の大きいMeOHトラックのケースでは420.25g-CO₂/MJ-MeOHの幅があることが分かった。DieselトラックのCO₂排出量が443.43 g-CO₂/MJ-Dieselであることを踏まえると、MeOHトラックではDieselトラック1台分のCO₂排出量に匹敵する幅があり、現状では原料輸送プロセスでいかにエネルギー投入量を減らすかが非常に重要となるであろう。

5. 考察

5.1 ライフサイクル全体の考察

まず、バイオ燃料製造システムのエネルギー収支比について考察する。今回、H₂の分析結果において、エネルギー収支比が最小となるケースではエネルギー収支比が1を下回ったことから、現状で市販燃料としての導入ポテンシャルを持っていると言えよう (Figure 2参照)。また、どのバイオ燃料の製造工程でも、エネルギー収支比に製造プロセスの所内動力が占める割合が大きく、平均で60%前後を占めることから、所内動力の削減が今後の課題である。今回の分析では、バイオ燃料製造に必要な熱動力を製造所内の排熱や製造後のオフガスで賄ったため、プラント外部からの加熱動力の投入はない。そのため、製造所内に投入された電力の大部分 (70.0 ~ 74.1%) は加圧動力として消費されたと考えられる。国産バイオ燃料の製造にあたっては、加圧動力をいかに減らすかが課題であることが分かった。

次に、今回対象としたバイオ燃料別の製造プロセスにおける課題は、次の通りである。まず、H₂製造プロセスでは、PSA部分での動力削減が必要であり、圧縮動力低減に向けた高性能な吸着材の開発が求められる。一方、MeOH合成では、低圧下における多段合成により、エネルギー投

入量を一定レベルまで下げられることがわかっている。また、MeOHは常温常圧下で液体であることから、液化に動力を必要とせずトラック燃料として扱いやすいと考えられる。但し、H₂燃料やMeOHについては、本研究の検討結果は、これまでの開発状況や燃料特性を勘案し、実走行時における燃費の評価を行っているが、今後の導入においては、輸送機械の開発が伴うこととなる。

次に、Well-to-Wheelにおいては、一定のCO₂削減効果が見られたDME及びFTDであるが、DMEは常温常圧下で気体であるため、加圧下で冷却しなければ液体燃料として使用できない。そのため、液化に要する動力は削減することが難しく、本研究で算出したWell-to-TankにおけるCO₂排出量のさらなる低減は望めない可能性が高く、MeOHのように低圧多段プロセスの検討も必要となろう。また、FTDは液体の状態で生成できるものの、FT合成油から精製しFTDのパスとなり、このときに要する動力を考慮しなければならない。さらに、FTワックスの水素化分解に投入するH₂の供給源の問題も考えられる。従来のLNG改質によりH₂を供給する場合はCO₂排出量を増加させる要因となるため、Bio-H₂の使用が望ましいが、FTD製造プロセスとは別にBio-H₂製造プロセスが必要となるため、プラントが大規模化する可能性がある反面、国内における大規模バイオマスプラントの導入は現実的ではない。そのため、国内バイオマスを原料としたFTD製造プラントの導入については、別のシステムを検討する必要がある。なお、前述したようにDME及びFTDに対する輸送機械については、既に開発されている、あるいは現状の機械仕様では運用できるメリットはある。

次に、原料の輸送距離及び含水率の不確実性の影響について考察する。Figure 2においては、どのバイオ燃料製造システムにおいても、原料輸送プロセスが大きく変動しており、最も変動幅の大きいH₂製造においては0.637 MJ/MJ-H₂の幅があることが分かった。一方、その他のプロセスではあまり変動が無いことがわかる。今回の条件設定の下では、所内動力や原料の前処理 (チップ化・乾燥) プロセスのエネルギー消費量は原料の不確実性によってあまり影響を受けないことが分かった。これまでの研究で、バイオ燃料製造システムでは乾燥プロセスで多くのエネルギーを必要とする場合があることがわかっている⁴²⁾。バイオ燃料製造システムの不確実性による影響を低減するために、今回想定した、乾燥動力をガス化炉の排ガスで賄うシステムは有用であると言えるだろう。さらに、原料輸送プロセスでのエネルギー投入量を抑えるため、廃材の集積地近隣などの原料発生量の多い地域にプラントを設置することも解決策のひとつであろう。また、Well-to-TankにおけるCO₂排出量は、エネルギー収支比の分析結果と同様に、原

料輸送と所内動力が大きな割合を占めている (Figure 3 参照)。しかしながら、Figure 2 と比較すると、電力に比べ CO₂ 排出原単位の大きい軽油を投入する原料輸送プロセスでは CO₂ 排出量が増加しやすい傾向にある。原料輸送での CO₂ 排出量削減には、輸送に使用する車両や燃料の低炭素化が必要であろう。また、エネルギー収支比の低減策同様、原料発生量の多い地域へのプラント設置も原料輸送時の CO₂ 排出量削減に有効である。

さらに、燃料製造時だけでなく、車両走行時においても燃費の改善によって CO₂ 削減効果が期待できる。軽油よりも燃費が劣ると仮定した H₂トラックや MeOHトラックの燃費が、仮に Dieselトラックと同等程度までの燃費の向上が可能となれば、H₂トラックや MeOHトラックのケースでも CO₂ 削減が可能となり、Well-to-Wheelにおける CO₂ 排出量の最小値は、H₂のケースでは軽油に対し 48.9%、MeOHのケースでは 33.7%の CO₂ 削減効果を得られることが分かった。

5.2 原料集約化による CO₂ 削減効果

今回対象としたライフサイクルでの CO₂ 排出量のうち、原料輸送及び製造所内で消費する電力が大部分を占めることが分かった。この結果から、今後、バイオ燃料製造システムを構築する上で、比較的原料が集約されており、輸送プロセスでの投入エネルギーを抑えられるようなシステムの提案や所内動力の過半を占める加圧動力の軽減が求められる。この結果を踏まえ、原料がより集約された地域にオンサイトのバイオ燃料製造プラントを建設したと仮定した場合、輸送距離をどれだけ削減すればライフサイクル全体の CO₂ 排出量削減につながるのかを試算した。ここでは、Figure 4 で示した CO₂ 排出量の平均値から、原料収集範囲の縮小、すなわち、原料輸送距離の最大値 (現状では 50km) の減少により、どのくらいの CO₂ 削減効果が得られるのかを分析した。ここでの CO₂ 削減効果 CO₂_RedEff [%] とは、

$$\text{CO}_2_RedEff = \frac{\text{CO}_2_Diesel - \text{CO}_2_Improve}{\text{CO}_2_Diesel} \times 100 \quad (9)$$

で与えられるものとした。但し、CO₂_Diesel: 軽油の Well-to-Wheel における CO₂ 排出量 [g-CO₂/km]、CO₂_Improve: バイオ燃料の Well-to-Wheel における CO₂ 排出量 [g-CO₂/km] とする。CO₂_Improve は、原料輸送距離を 50-5km の範囲で 5km ずつ減少させた場合の CO₂ 排出量である (Figure 5 参照)。また、Well-to-Wheel において唯一 CO₂ 削減が達成できていない MeOH のケースでは、原料輸送距離の最大値が 21.4km の条件で Well-to-Wheel における CO₂ 排出量が軽油と同等となり、最大値が 9.6km の条件で 10% の CO₂ 削減が可能であることが分かった。本研究

では、原料輸送範囲を 5-50km と仮定しているが、原料輸送距離の削減のみにより軽油と同等の CO₂ 排出量を達成するには、現状の 19.3% のごく狭い範囲 (面積) で原料収集を行わねばならず、現実的ではない。従って、現在バイオマスから製造される MeOH を代替燃料として考えた場合、所内動力の削減と走行燃費の向上無しには環境面での優位性が生まれまいと言えよう。

5.3 大規模化によるエネルギー収支比の影響

エネルギープラントの効率改善には、一般的には大型化が必要であることが知られている。これは、炉のサイズが大きくなることで、投入原料あたりの熱損失の改善や利用できる排熱の量を多くすることができ、最終的に外部エネルギー量の投入が減少し効率の改善が図られることとなる。これまで検討されてきたバイオ燃料製造システムでは、比護らによる加圧流動床ガス化炉を用いた DME 合成プロセスが挙げられる⁴²⁾。このプロセスでは、50t/d 規模の流動床ガス化方式により、原料ガスが部分酸化され合成ガス中の H₂/CO 比が 1.0 となるような燃料ガスを生成する。また、所内の排熱が大きいので所内動力を排ガスによる蒸気発電で賄うことができる。このように、大規模化によって、多くの原料を必要とし、原料輸送におけるエネルギー投入量は増大するものの、エネルギー変換プロセスでは排熱利用によってエネルギー投入を抑えることができるなど、結果的には、製造燃料の CO₂ 原単位の削減につながる。

一方、今回の BT プロセスによるバイオ燃料製造では、エネルギー生産と所内の熱動力との間にトレードオフの関係があるため、当該ガス化炉の効率向上のためには、排ガスの有効利用や熱動力をバイオマス原料の追加により補う方式などの対策が必要となる。これらの対応策は、製造する燃料により、プロセスのどのポイントから熱源を得るのか、あるいはどのような外部燃料を利用するのかなどの検討がなされており、これまでもこのような対策を考慮した MeOH 及び DME 製造プロセスが考案されている^{16, 17)}。この結果、製造される燃料の CO₂ 原単位の低減が見込まれることとなる。

ここでは、1 章で述べてきたように、燃料供給ステーションの役割と原料供給条件のリスク軽減のため、小規模の当該ガス化炉のシステムの導入ポテンシャルは高い。従って、大規模システムと当該システムとの比較を行い、本研究の小規模燃料システムにおいても、CO₂ 削減効果が得られるのかどうか比較検討を行った。

- Fluidised-bed (Air) : 50t/d 加圧流動床ガス化炉 (空気吹き) による DME 合成
- Fluidised-bed (Oxygen) : 50t/d 加圧流動床ガス化炉 (酸素吹き) による DME 合成

- BT-MeOH (w/ Biomass) : 12t/d BT ガス化炉 (バイオマス利用) による MeOH 合成
- BT-MeOH (w/o Biomass) : 12t/d BT ガス化炉 (外部電力使用) による MeOH 合成
- BT-DME (w/ Biomass) : 12t/d BT ガス化炉 (バイオマス利用) による DME 合成
- BT-DME (w/o Biomass) : 12t/d BT ガス化炉 (外部電力使用) による DME 合成

これらのバイオ燃料製造プロセスについて、エネルギー収支比と CO₂ 排出量 [g-CO₂/km] の比較を行った (Figure 6 参照)。なお、CO₂ 排出量の算出には (3) 式を用いた。

その結果、大規模システムのエネルギー収支比は天然ガス由来の MeOH/DME を上回るレベルまで改善される。これは、大規模化によって原料輸送におけるエネルギー投入量が増大するデメリットよりも、エネルギー変換時のエネルギー投入量を削減できるメリットの方が大きいことを示している。

Figure 5. Difference of CO₂ Emission Reduction Effect due to Transportation Distance

次に、規模の拡大によるエネルギー収支比の変化の内訳を、DME 製造を例に Figure 7 に示した。規模を変化させないまま熱動力としてバイオマス原料を使用した場合 (BLUE Tower (12t/d) w/ Biomass)、原料輸送時にエネルギー投入量が若干増加するものの、エネルギー変換時の削減分の方が大きいことが分かる。また、12t/d から 50t/d に規模を拡大した場合 (Fluidized-bed (50t/d))、原料輸送時のエネルギー投入量は増加するものの、DME 製造量も増加するためエネルギー収支比は小さくなる。また、排ガスによる発電で所内動力を賄えるため、エネルギー変換時に外部からのエネルギー投入は無い。一方で、BT による小規模システムにおいても、エネルギー収支比においては、流動床ガス化炉のような大規模システムには劣るものの、天然ガス由来の MeOH/DME の CO₂ 原単位よりも低くなるケースがあり、小規模システムによるバイオマス由来の液体燃料の可能性が広がる。特に、MeOH については、低圧合成や Bio-H₂ 及び天然ガスの発電所から分離される CO₂ を原料にした合成などの検討を含め、CO₂ 削減可能なエネルギーパスの構築を考えていく予定である。これらの考察については、今後、さらに関連実験の成果を踏まえ、検討していくこととし、その成果を報告していくこととしたい。

5.4 製造側と使用側の評価

これまで得られた結果から、バイオ燃料の導入可能性は製造側と使用側に分けて評価することができる。さらに、燃料の違いによって解決すべき課題はそれぞれ異なることが分かった。筆者らは、現時点でのバイオ燃料導入可能性を、製造プロセスにおける所内動力の観点とエンドユーザー視点での導入しやすさの観点から、成績の良かった順

Figure 6. Advantage of Large-Scale Bio-Fuel Production System

Figure 7. Energy Intensity of the DME Synthesis on Different Scales

Table 4. Comparison of Fuel Promotion Potential due to LCI Indexes

Evaluation Item		H ₂	MeOH	DME	FTD	Note
Production	P-1	◎	△	○	×	In all cases, energy intensity exceeds 1 MJ/MJ.
Using	U-1	?	?	○	◎	-
	U-2	△	△	○	◎	-

に◎、○、△及び×の4段階で評価した（Table 4参照）。なお、表中の“?”は現状では評価できないことを表す。また、評価項目として、

- P-1: 現状での製造プロセスにおける所内動力
- U-1: バイオ燃料トラックの走行燃費（エンドユーザーにとっての導入メリット）
- U-2: 車両開発状況（エンドユーザーにとっての使いやすさ）

の4つである。

まず、製造面での評価であるが、P-1ではエネルギー収支の小さい順に、H₂が1位、DMEが2位、MeOHが3位であり、FTDが最下位となった。特に、MeOH及びFTDはエネルギー収支が比較的大きい結果となった。

次に、車両面での評価である。U-1では、Dieselトラックと比較した場合、従来のDieselエンジンにそのまま適用でき、[km/L]単位で評価した燃費性能では軽油と同等なFTDの燃費が1位となった。DMEは2位であるが、燃費性能[km/L]ではDieselトラックに劣る。なお、現在走行試験の行われていないH₂トラック及びMeOHトラックは対象から外した。U-2では、FTDは燃料性状に最適化させるためのエンジンの改造（高EGR化、低空気過剰率化、低圧縮比化、燃料噴射特性の最適化）が必要であり、排出ガス後処理装置はDieselと同様の装置（微粒子除去装置[DPF]、NO_x低減触媒）を必須とする。一方、DMEでも

燃料噴射系の改造や燃料容器の変更が必要となるが、排出後処理装置（DPF、NO_x触媒）は不要（取り外し）となるため、両者は同位とした。また、MeOHトラックは以前製造されていたものの、寒冷下におけるエンジンの始動性低下、燃料配管への腐食対策が必要などの理由及び原油価格の安定化などによる代替燃料の必要性が薄らぐなかで、現在は製造されていない。こういった現状を考慮しMeOHは3位とした。さらに、H₂自動車は東京都市大学などが研究を行っているが⁴³⁾、トラック用H₂エンジンシステムについては開発段階であることから、MeOHと同様にH₂は3位とした。

最後に、CO₂削減対策として、まずMeOHには低圧多段合成の可能性がある。MeOHは常温で液体であるため自動車への充填のための特別な処理を必要としないことが大きな利点である。車両側では、現状ではMeOH自動車にはOttoサイクルエンジンが使用されているが、Dieselサイクルの使用についての研究・車両開発も行われており、MeOHは代替燃料としてのポテンシャルを持つと言えよう。一方、H₂及びDMEは、圧縮動力の低減の可能性があるが、いずれも自動車への搭載のために冷却や圧縮などの操作を必要とする。

以上の評価から、バイオ燃料は種類により一長一短であり、それぞれ異なる長所・短所を持つことが分かる。すなわち、FTDのように燃料としての性能は高いものの、国内

での製造には向かないものが考えられる。なぜなら、FTD製造プロセスの他に、FTワックスの水素化分解プロセスで消費するBio-H₂を製造するためのプラントが必要となるため、プラントが大規模化する恐れがあり、必要となる原料を国内で確保しようとする、原料輸送コストが増大する可能性があるためである。その一方で、MeOHのように、製造プロセスでは所内動力削減の可能性があるが、車両の普及に課題を抱えるものがある。バイオ燃料のライフサイクルにおいてどのプロセスに課題があるのか、解決できる可能性はあるのかを、実現可能なプロセスデータ及び実車両による走行試験結果から導くことができたことは、今後バイオ燃料開発を進める上で1つの重要な指標となろう。

5.5 既往研究との比較

本論文では、将来導入が見込まれている、木質バイオマスガス化による合成燃料を対象にLCA分析を行ったが、主に植物油などを原料とするバイオ燃料（Bio Diesel Fuel: BDF）についてのLCAによる環境影響評価も行われている。

IFEU (Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg Germany) のQuirinらは、Well-to-Wheelにおけるバイオ燃料のLCAを行っており、Dieselトラックと比較した場合のCO₂削減量は以下のとおりである⁴⁴⁾。

BDF : 20 ~ 164 g-CO₂/km

一方、本研究の分析対象としたバイオ燃料のCO₂削減量は以下のとおりである。なお、削減量が負の値となっているものは、DieselトラックのCO₂排出量よりも増加していることを示す。

H₂ : -197.91 ~ 176.90 g-CO₂/km

MeOH : -368.77 ~ 51.48 g-CO₂/km

DME : -124.60 ~ 168.70 g-CO₂/km

FTD : -157.34 ~ 152.15 g-CO₂/km

本研究の分析結果から、我が国においても、既にBDF燃料の実用化がされており、おそらくQuirinらの分析と同様な効果が得られると推測され、軽油代替としての燃料の役割を果たすこととなろう。しかしながら、BDFの原料は、主に第一世代のバイオマス資源であり、一方で、食糧との競合も懸念されるところであり、軽油代替の燃料の導入には、さらに、他のバイオマスの原料及びそれに伴う適切なエネルギー変換技術や供給条件を勘案した評価が必要となり、その中で最適なエネルギーパスの選択により代替軽油の燃料化が実現していくことが重要となる。本研究における木質バイオマスを原料とした小規模プラントにより製造されるバイオ燃料にも、BDFなどの既に実用化されているバイオ燃料と同等のCO₂削減効果があり、代替軽油のための1つのエネルギーパスとなり得る。

6. おわりに

本研究では、これまでのバイオ燃料製造に関連した研究や、Bio-Diesel車の走行試験結果を踏まえ、国内のスギ材から製造されるH₂, MeOH, DME及びFTDを対象とした、オンサイトでの12t-dry/dプラントにおけるバイオ燃料製造と走行時を含めたライフサイクル分析を行った。木質バイオマスのガス化プロセスには、小規模分散型対応のガス化方式であるBTプロセスを選定し、走行時の分析では、実際の走行状態を反映したJE05モード走行時の4t積載トラックの燃料消費量データをもとに、各燃料の燃焼時におけるCO₂排出量を算出し、ライフサイクル全体へと反映させた。

その結果、国内のバイオマス資源を利用したバイオ燃料製造においては、製造時の所内動力の削減と車両燃費の向上が今後の課題であることが示唆された。また、これまで行われてきたバイオマス利用に関連する研究同様、原料の輸送距離と初期含水率における不確実性によって結果が大きく変動した。本研究の場合では、特に原料輸送プロセスへの影響が大きいことがわかり、バイオ燃料のCO₂削減効果は製造条件によって大きく変化するものであった。

さらに、TtWでJE05モード燃費を分析した結果、バイオ燃料は軽油よりも熱効率が良いことが分かった。これは、今後のバイオ燃料の普及に向け重要な意味を持つであろう。また、小規模分散型を前提としたバイオ燃料製造システムをWell-to-Wheelによる評価では、Bio-Diesel車導入に際し実用に資する環境指標の基礎となるデータを提供できたと言えるだろう。

本研究では、原料としてスギ材を想定し分散型ガス化システムでの代替軽油のエネルギーパスを検討してきたが、今後、本研究のような分析結果をより実用的な段階に近づけるために、次のような視点での分析も必要となろう。本研究においては、ガス化技術を中心としたエネルギーパスを想定しているが、これに限定した場合には、原料供給の持続可能性、ガス化原料の多様性、ガス化技術の方式や規模による選択がLCA指標に影響を与えることとなる。また、燃料を利用する側においては、燃料供給の方式や貯蔵の条件、特に、H₂の場合には、漏れ防止のための安全な貯蔵方法の検討やそれに伴う重量増加がトラックの燃費に大きく影響を与える可能性があり、さらに、各燃料によるエンジンの寿命及び性能などの条件については、今後の技術の進展を踏まえ考察していく必要がある。

今後は、以上の視点を考慮しつつ、まずは、燃料化への初期の段階として、燃料合成実験による製造時の所内動力削減策の提案や走行試験などによる車両燃費の向上が必要であることも示唆され、これらの事項については研究課題としたい。

(平成24年6月25日受付、平成24年12月1日採択)

参考文献

- 1) 農林水産省, バイオマス・ニッポン総合戦略, 農林水産省ホームページ, 入手先 <http://www.maff.go.jp/j/biomass/pdf/h18_senryaku.pdf>, (参照 2012-6-25)
- 2) 農林水産省, 「我が国の食と農林漁業の再生のための基本方針・行動計画」に関する取組方針, 農林水産省ホームページ, 入手先 <<http://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/kihyo02/pdf/111224-03.pdf>>, (参照 2012-6-25)
- 3) 独立行政法人 国立環境研究所, 2010年度(平成22年度)の温室効果ガス排出量(確定値)について, 独立行政法人 国立環境研究所ホームページ, 入手先 <<http://www.nies.go.jp/whatsnew/2012/20120413/about.pdf>>, (参照 2012-6-25)
- 4) 河合英直 (2008): 交通安全研究所フォーラム2010講演概要集, 東京, 15
- 5) 経済産業省 資源エネルギー庁, エネルギー基本計画, 経済産業省 資源エネルギー庁ホームページ, 入手先 <<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/kihonkeikaku/100618honbun.pdf>>, (参照 2012-6-25)
- 6) 農林水産省, バイオマス活用推進基本計画, 農林水産省ホームページ, 入手先 <http://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_kihonho/pdf/keikaku.pdf>, (参照 2012-2-28)
- 7) 独立行政法人 交通安全環境研究所, 次世代低公害車・開発実用化推進プロジェクト, 独立行政法人 交通安全環境研究所ホームページ, 入手先 <<http://www.ntsels.go.jp/efv/efv02.html>>, (参照 2012-6-5)
- 8) 佐藤由雄, 中村明 (2007): 自動車技術, 61(11), 81-86
- 9) トヨタ自動車株式会社, みずほ情報総研株式会社 (2004): 輸送用燃料のWell-to-Wheel評価, 1-115
- 10) 佐藤由雄 (2010): 交通安全環境研究所フォーラム2010講演概要集, 東京, 17-24
- 11) 石井素 (2010): 交通安全環境研究所フォーラム2009講演概要集, 東京, 67-70
- 12) 独立行政法人 交通安全環境研究所, 次世代低公害車開発・実用化促進プロジェクト, 独立行政法人交通安全環境研究所ホームページ, 入手先 <<http://www.ntsels.go.jp/efv/efv02.html>>, (参照 2012-9-12)
- 13) 社団法人 日本エネルギー学会 (2009): “将来的なエネルギーシステムの可能性-ガソリン・灯油利用”, バイオマスハンドブック第2版, オーム社, 東京, 311
- 14) 社団法人 日本エネルギー学会 (2009): “バイオマスの定義と分類”, バイオマスハンドブック第2版, オーム社, 東京, 2-4
- 15) 財団法人 日本自動車研究所 総合効率検討作業部会 (2011): 総合効率とGHG排出の分析報告書, 財団法人 日本自動車研究所, 1-123
- 16) Pak A., A Well-to-Wheels Lifecycle Assessment of Used Vegetable Oil Biodiesel Produced On MIT Campus, Biodiesel@MITホームページ, 入手先 <<http://biodiesel.scripts.mit.edu/biodiesel/wp-content/uploads/2012/07/A-Well-to-Wheels-Lifecycle-Assessment-of-Used-Vegetable-Oil-Biodiesel-Produced-On-MIT-Campus.pdf>>, (参照 2012-11-21)
- 17) Dowaki K., Genchi Y. (2009): Int. J. LCA, 14, 611-620
- 18) 堂脇清志, 江口勉, 大久保壘, 玄地裕 (2008): 電気学会論文C, 128(2), 167-175
- 19) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2010): バイオマスエネルギー導入ガイドブック (第3版), 99
- 20) Higo M., Dowaki K. (2010): Applied Energy, 87, 58-67
- 21) 堂脇清志, 大久保壘, 岡戸聡, 石山智之, 布浦鉄兵 (2012): 第7回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, 野田, 176-177
- 22) 株式会社日本計画機構 (現: 株式会社ジャパンプルーエナジー), ブルータワー技術, 株式会社日本計画機構ホームページ, 入手先 <<http://www.jpo-net.co.jp/technology.html>>, (参照 2012-2-1)
- 23) 亀山光男, 小倉伸介, 上内恒, 堂脇清志 (2010): エネルギー資源, 31(2), 43-50
- 24) Dowaki K. (2011): “Energy Paths due to Blue Tower Process”, Biofuel's Engineering Process Technology, InTech, USA, 585-610
- 25) 社団法人 日本自動車工業会, 新長期規制の概要と大型ディーゼルの排出ガス低減技術, 社団法人 日本自動車工業会ホームページ, 入手先 <<http://www.jama.or.jp/lib/jamagazine/200803/05.html>>, (参照 2011-10-24)
- 26) 橋本征二, 小原卓巳, 寺島泰 (2000): 土木学会論文集Ⅶ, 37-48
- 27) 社団法人 産業環境管理協会, CFP算定用二次データ, CFPプログラムホームページ, 入手先 <<http://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/data.html>>, (参照 2012-6-23)
- 28) 財団法人 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット編 (2011): “世界の電源構成”, エネルギー・経済統計要覧, 省エネルギーセンター, 東京, 224-225
- 29) 経済産業省, 国土交通省, 物流分野のCO₂排出量に関する算定方法ガイドライン, グリーン物流パートナーシップホームページ, 入手先 <<http://www.greenpartnership.jp/pdf/co2/co2brochure.pdf>>, (参

照 2012-9-15)

- 30) 独立行政法人 交通安全環境研究所, 次世代低公害車開発・実用化促進プロジェクト 第二期水素エンジン, 独立行政法人 交通安全環境研究所ホームページ, 入手先 <<http://www.ntsels.go.jp/efv/02/suiso.html>>, (参照 2012-6-23)
- 31) 加藤啓広, Yang Y. T. (2009): 日本エネルギー学会誌, 88, 480-485
- 32) 堀政彦 (1993): Readout 6 特集 自動車をはかる メタノールエンジン最近の動向, 株式会社堀場製作所, 17-21
- 33) 福岡三郎, 舟島正直, 横田久司, 梅原秀夫, 泉川碩雄, 古明地哲人, 岩崎好陽, 辰市祐久, 朝来野国彦, 小早川敏政, 飯田靖雄, 風間秀泰, 京田三恵 (1988): メタノールトラック (ディーゼル車対応) からの汚染物質排出実態, 東京都環境科学研究所年報, 17-29
- 34) 社団法人 日本エネルギー学会 (2008): “フィッシャー・トロプシュ合成”, バイオマス用語辞典, オーム社, 東京, 311-315
- 35) 藤本真司, 花岡寿明, 隈部和弘, 尾方護, 柳田高志, 福田哲久, 矢部彰, 美濃輪智明 (2006): 日本エネルギー学会大会講演要旨集 (15), 東京, 157-158
- 36) 村田和久, 岡部清美, 高原功, 稲葉仁, 劉彦勇 (2011): 日本エネルギー学会誌, 90, 505-511
- 37) 花岡寿明, 宮沢朋久, 松永興哲, 劉彦勇, 平田悟史, 坂西欣也 (2011): 日本エネルギー学会誌, 90, 31-36
- 38) 川村淳浩, 野内忠則, 佐藤由雄, 後藤雄一, 高木靖雄, 山根公高, 長沼要 (2007): 交通安全環境研究所フォーラム2007講演概要集, 東京, 107-108
- 39) United States Department Of Energy, Vehicle Technologies Program, United States Environmental Protection Agencyホームページ, 入手先 <<http://www.epa.gov/oar/caaac/mstrs/oct2011/davis.pdf>>, (参照 2012-9-15)
- 40) 独立行政法人 交通安全環境研究所, 重車両の実走行燃費に対する各種影響要因のシミュレーション解析, 独立行政法人 交通安全環境研究所ホームページ, 入手先 <<http://www.ntsels.go.jp/forum/13files/13-10p.pdf>>, (参照2012-9-15)
- 41) Cohn D. R., Use Of Methanol In Flex Fuel Heavy Duty Trucks, Methanol Instituteホームページ, 入手先 <<http://www.methanol.org/Energy/Transportation-Fuel/Methanol-Policy-Forum-2012/Session-1-Methanol-Markets/DanielCohn.aspx>>, (参照 2012-9-15)
- 42) 比護正志, 堂脇清志 (2008): 日本LCA学会誌, 4 (3), 253-259
- 43) 東京都市大学グループ 学校法人 五島育英会, 東京都市大学 (旧: 武蔵工業大学) 水素自動車研究開発の歩み, 学校法人 五島育英会ホームページ, 入手先 <<http://www.goto-ikuei.ac.jp/01topics/2009/files/TCU-MI-TECH-H2.pdf>>, (参照 2012-6-23)
- 44) Quirin M., Gartner S.O., Pehnt M., Reinhardt G. A. (2004): CO₂ Mitigation through Biofuels in the Transportation Sector, Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg Germany, 12-21
- 45) 三菱ふそうトラック・バス株式会社, CANTER主要諸元, 三菱ふそうトラック・バス株式会社ホームページ, 入手先 <http://www.mitsubishi-fuso.com/jp/lineup/truck/canter/10n/pdf/spec_dvan_dwing_2012.pdf>, (参照 2012-11-25)