

⑤ 次世代バイオマス燃料自動車の LCA

—木質バイオマスを原料とするガス化合成燃料の事例分析—

環境研究領域 ※佐藤 由雄 川野大輔 石井 素
 東京理科大学大学院 渡辺 佑太郎
 東京理科大学 小井土 賢二 堂脇 清志

1. はじめに

バイオマスから製造される燃料は、製造時に多量のエネルギーを費やしたり、車両に用いた場合には排出ガス性能が悪化するケースがある。将来的に有望なバイオマス燃料を選択していくためには、車両への適用性及び温室効果ガス (GHG) 排出量等を含めた総合的な環境負荷を評価する手法を確立していく必要がある。

本研究はそうした観点にたち、今回は、木質バイオマスを原料としガス化合成により製造される燃料を取り上げ、原料の前処理・輸送から燃料の製造そして車両走行の全体を通じての CO₂ 排出量について LCA (Life Cycle Assessment: ライフサイクルアセスメント) を行った。分析の対象として、これまでに石油代替燃料として使用実績のあるメタノール、現在、研究開発及び実証試験が進められている水素、ジメチルエーテル及び合成軽油を燃料とする重量車 (車両総重量: 3.5 トン以上のトラック、バスなど) とした。

2. LCA のシステム境界

図1に本研究で行った LCA のシステム境界を示す。今回は、原料のチップ化、輸送、乾燥の前処理からガス化、合成・精製までの「燃料製造プロセス」を Well-to-Tank (WtT)、製造されたバイオ燃料を重量車に用いる「車両走行プロセス」を Tank-to-Wheel (TtW)、そして「燃料製造から車両走行までの一連のプロセス」を Well-to-Wheel (WtW) と定義した。なお、今回の LCA では、車両の製造、使用過程でのオイル、消耗部品の交換及び廃棄、リサイクルなどで排出される CO₂ 量についてはシステム境界外とし、車両の単位走行距離あたりの CO₂ 排出量で評価した。

本研究では、WtT のエネルギー収支比を EI [MJ/MJ-Fuel]、バイオ燃料 1MJ 製造時の CO₂ 排出量を CO₂_Prod [g-CO₂/MJ-Fuel]、TtW 及び WtW における 1km 走行時の CO₂ 排出量を CO₂_Run [g-CO₂/km] とし、それぞれ次式で定義した。

$$EI = (E_Cons) / (E_Prod) \quad (1)$$

$$CO_2_Prod = (CO_2_Emit) / (E_Prod) \quad (2)$$

$$CO_2_Run = (CO_2_Prod) / FC \quad (3)$$

ここで、

E_Con: WtTプロセスの投入エネルギー量[MJ/h]

E_Prod: 製造される燃料のエネルギー量[MJ-Fuel/h]

CO₂_Emit: WtTにおけるCO₂排出量[g-CO₂/h]

FC: 車両の走行燃費[km/MJ-Fuel]

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、表 1 に投入した各エネルギーの CO₂ 排出係数を示した¹⁾²⁾。また、バイオマス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、ここでは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%で割り戻した値を用いた³⁾。

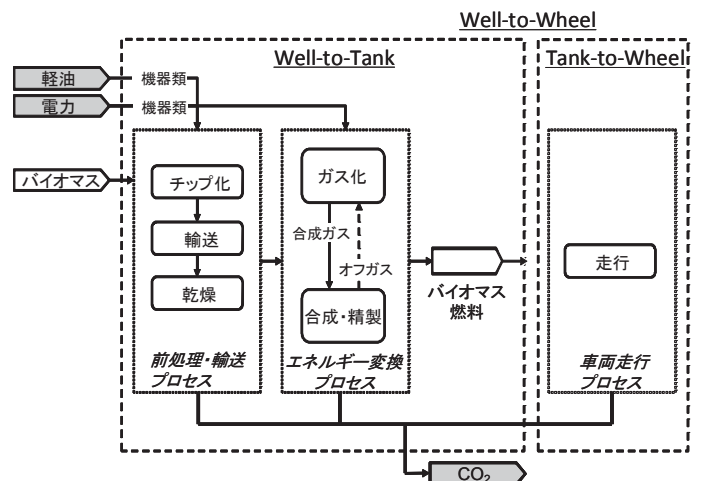


図1 本調査研究における LCA のシステム境界

表1 投入エネルギーのCO₂排出係数

投入エネルギー	単位	低位発熱量 MJ	CO ₂ 排出係数 kg-CO ₂	備考
バイオマス	kg	13.233	0.00	杉, 原料用, カーボンニュートラルとした
電力	kWh	-	0.385	発電効率: 42.0%
軽油	L	35.5	2.74	チップ化用, 輸送用

3. 各プロセスの概要と評価方法

3. 1. 燃料製造プロセス

3. 1. 1. 原料の前処理・輸送プロセス

国内の木質バイオマスの賦存状況やタール発生量などを勘案し、原料は杉の加工廃材とした。原料の収集範囲を狭めて輸送距離を低減するため原料投入量が 12t-dry/day の小規模分散型の燃料製造プラントとし、オンサイトでの燃料製造を基準として評価した。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の輸送距離を 5-50km と想定¹⁾、さらに、原料の初期含水率を 20-50% と仮定した。これら二つの要因が独立に一様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⁴⁾して評価した。なお、計算回数は 10,000 回とし、5%有意として求めた。

原料は、図1に示したようにチップ化（軽油、電力使用）された後、最大積載量 10 トンのトラック（軽油使用）により燃料製造プラントまで輸送されるとした⁵⁾。ガス化炉投入前の原料チップの乾燥工程では、含水率を 20%まで下げるため、プラントの燃焼排ガスを使用することを想定した。なお、この時は乾燥エネルギー消費量はゼロとなるが、燃焼排ガスの熱量が不足する場合は、蒸気ボイラ（軽油、電力使用）を併用することとした。

3. 1. 2. エネルギー変換プロセス

(1) 原料のガス化システム

原料のガス化により燃料の合成に必要な H₂ と CO を得る。ここでは小規模分散型対応の移動層式ガス化炉のひとつである Blue Tower (BT) プロセス⁴⁾を選定した。このプロセスで必要な熱動力は、全て内部で賄えるようにシステムを設計した。ガス化及び各燃料の製造システムの諸元等を表2に示す。

(2) 燃料の製造・合成システム

① 水素製造

BTプロセスによるガス化では水素 (H₂) が比較的、高い濃度で生成されるという特徴をもつ。この合成ガ

表2 原料のガス化及び各燃料製造システムの諸元等

プロセス	単位	H ₂	MeOH	DME	FTD	
原料ガス化 (BTプロセス)	規模	t-dry/d	12	12	12	
	バイオマス供給量	kg/h	635.9	635.9	635.9	
	冷ガス効率	LHV-%	59.9	59.9	59.9	
燃料製造	製造量	Nm ³ /h	305.0	-	-	
		L/h	-	196.9	169.7	72.3
	温度	°C	40	170	190	250
	圧力	MPaA	0.8	3.0	3.0	5.1

スからPSA (Pressure Swing Adsorption: 圧力スイング吸着, 運転圧力: 0.8MPaA) により純度99.99%まで濃縮したH₂を回収する。回収後のH₂は35MPaまで圧縮し車両に充填するものとした。H₂の製造システムでは圧縮動力の占める割合が大きくなる。

② メタノール合成

メタノール (MeOH) の合成反応では、平衡転化率が最大となる合成ガス中のH₂/CO比は2である。このときの反応式は次の(4)式で表される。



MeOH合成に必要な動力を極力低減させるため、今回は170°C, 3MPaAの条件での単段合成を想定した。

③ ジメチルエーテル合成

ジメチルエーテル (DME) の合成法には、間接法と直接法の2種類がある。ここでは一つの反応器内でMeOHの脱水反応とDME合成が生じる直接法とした。反応器内で起こる総括反応式は次の(5)式となる。



(5)式の反応が進むとDMEとH₂Oの混合気体が得られるが、これを常温まで冷却して気液分離し、更にDMEを液体に転換するため-25°Cまで冷却する。

④ 合成軽油製造

触媒を用いてFischer-Tropsch (FT)法により合成ガスから燃料を合成するシステムでは、次の化学反応式(6)にしたがい炭化水素 (FT合成粗油) が合成される。



このとき、反応器内ではC₁からC₂₀を超える直鎖パラフィンが生成され、一般的には、これを水素化処理して灯油や軽油などの燃料に転換する。今回は、市販の自動車用軽油の性状規格を満たす合成軽油 (FTD) の製造を想定した。そのため、Ru-Mn/Al₂O₃触媒を用いてまずFT合成粗油を製造し、その中でFTDと見なせるC₁₁-C₂₀成分を蒸留により回収 (原料熱量比で30%) し、さらにC₂₀₊のFTワックスについては水素化分解によりFTDを製造し、FTDの収量を増加 ([原料+水素]熱

量比で40%)させた。C₁-C₁₀についてはオフガスとしてプラント内動力に用いた。なお、FT合成の反応条件や合成ガスからのCO転化率は既往の研究⁶⁾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⁷⁾。また、水素化分解処理でのH₂消費量は文献値を用いた⁸⁾。

3. 2. 車両走行プロセス

製造された各バイオマス燃料は、内燃エンジンを動力源とする最大積載量が約4トンの中型トラックの実走行に用いられることを想定した。走行モードは重量車の実走行を反映したモードとして排出ガス試験に用いられるJE05(半積載条件)を選定し、シャシー台上試験によりCO₂排出量[g/kWh]と燃費[km/MJ]等を測定した。表3に軽油、DME及びFTDを燃料としJE05モードを運転した場合の排出ガス、燃費データ⁹⁾¹⁰⁾を示す。H₂とMeOHの燃費は、対応する中型トラックが確保できなかったため、軽油とH₂、MeOHの燃料性状及び燃焼サイクルの違いを考慮し、それぞれ軽油の燃費の85%、75%と推定した。

4. 分析結果

4. 1. 燃料製造プロセスにおけるエネルギー収支比

図2に各バイオマス燃料の原料の輸送・前処理及び

表3 各燃料を用いた中型トラックの排出ガスと燃費

項目	単位	軽油	H ₂	MeOH	DME	FTD
走行モード	-	JE05	JE05	JE05	JE05	JE05
積載率	%	50	50	50	50	50
走行距離	km	13.892	13.892	13.892	13.892	13.892
CO ₂ 排出量	g/kWh	835.0	-	-	731.5	820.0
NO _x 排出量	g/kWh	2.10	-	-	0.73	0.47
低位発熱量	MJ	38.9/L	10.8/Nm ³	15.8/L	19.2/L	36.1/L
	km	6.60/L	(1.56/Nm ³)	(2.01/L)	3.48/L	6.36/L
燃料消費率	km/MJ-Fuel	0.169	(0.144)	(0.127)	0.181	0.176
	MJ-Fuel/km	5.90	(6.94)	(7.87)	5.52	5.68

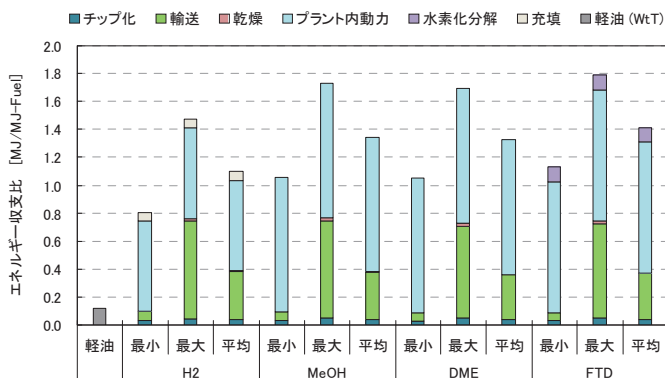


図2 燃料製造プロセス(WtT)のエネルギー収支比

エネルギー変換までの燃料製造プロセス(WtT)におけるエネルギー収支比を示す。最小値、最大値及び平均値は、原料の輸送距離及び含水率に幅をもたせて評価したことによる。なお、参考として、軽油のWtTでのエネルギー収支比¹¹⁾を図中に併記した。

各バイオマス燃料1MJの製造に必要なエネルギー量[MJ/MJ-Fuel]は、H₂の最小値をとるケースを除き、いずれのバイオマス燃料においても1.0を上回り、投入エネルギー量と比べて得られるエネルギー量の方が少ないという結果となった。また、原料輸送及び製造プラント内の動力で90%前後(原料ガス化と燃料合成に要する動力、平均値)を占めていることがわかった。FTDの製造には水素化分解における投入エネルギー量が加算されるためエネルギー収支比は最も高くなった。

4. 2. 燃料製造プロセスにおけるCO₂排出量

図3に燃料製造プロセス(WtT)における各バイオ燃料のCO₂排出量[g-CO₂/MJ-Fuel]の最小値、最大値及び平均値を示した。各バイオマス燃料のCO₂排出量の傾向を比べると上述したエネルギー収支比の傾向とほぼ同じであった。DMEはエネルギー収支比ではH₂なみの低い値であったが、CO₂排出量で評価した場合はH₂より高く、MeOH、FTDと同程度となる。

4. 3. 前処理・輸送、燃料製造及び車両走行プロセスにおけるCO₂排出量

前処理・輸送、燃料製造及び車両走行プロセス(WtW)におけるCO₂排出量[g-CO₂/km]を評価するため、図3に示した燃料製造プロセス(WtT)でのCO₂排出量[g-CO₂/MJ-Fuel]に、表3中のJE05モード燃費[MJ-Fuel/km]を乗じて算出した。その結果を図4に示す。ここでは、比較のため軽油トラックの算出値を図中に記した。軽油トラックから排出されるCO₂はカウント

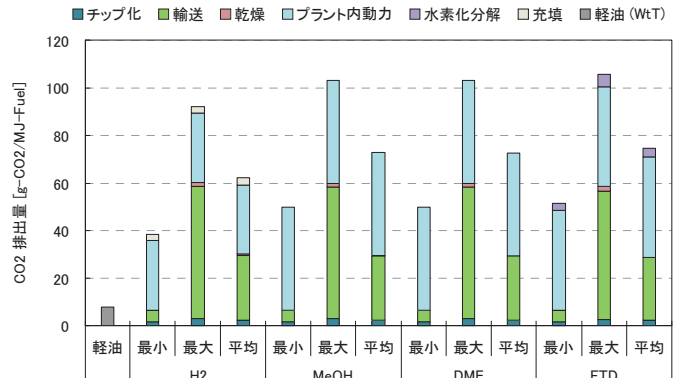


図3 燃料製造プロセス(WtT)のCO₂排出量

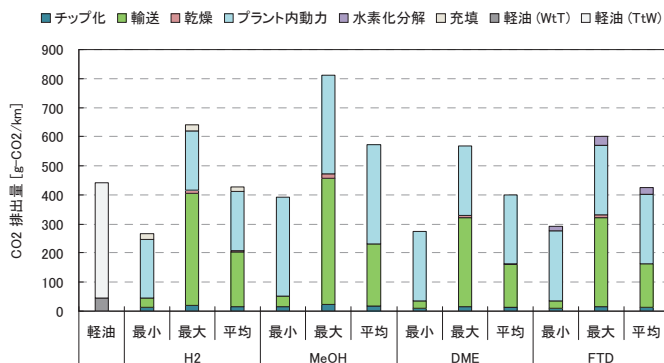


図 4 前処理・輸送、燃料製造及び車両走行プロセス (WtW)における CO₂ 排出量

しているが、バイオマス燃料を用いたトラックでは排出CO₂はカーボンニュートラルとして扱い、ゼロカーボンとして扱っている。

図4より、CO₂排出量[g-CO₂/km]は軽油の場合と比べて、最大値をとる場合は、H₂で45%、DMEで28%、FTDでは35%、それぞれ増加となるものの、最小値では、H₂で39.9%、DMEでは38.0%、FTDでは34.3%のCO₂削減効果が得られる。この結果から、H₂、DME及びFTDは原料輸送と燃料製造プロセスの最適化によっては軽油と比べて大幅なCO₂削減が行える可能性があると考えられる。また、MeOHではCO₂排出量が最小ケースでは11.6%の削減効果が得られるものの最大ケースでは83.2%もの増加となるなど、現時点では他の燃料と比べて低炭素燃料としてのポテンシャルが低いという結果となった。

5. まとめ

今回、国内で産出される木質バイオマス（杉の加工廃材）を原料とし、小規模分散型対応のガス合成プラントにおいて製造されるH₂、MeOH、DME及びFTDを対象とし、これらを重量車に適用した場合のライフサイクルでのCO₂排出量等について事例分析を行い、以下の知見を得た。

- (1) 各バイオマス燃料の製造プロセスにおけるエネルギー収支比[MJ/MJ-Fuel]は1.0を上回り、原料輸送と製造プラント内の動力で90%前後を占めた。また、各燃料の製造時のCO₂排出量[g-CO₂/MJ-Fuel]の傾向はエネルギー収支比の場合と同様であった。
- (2) 今回の事例分析からは、バイオマス燃料の製造から車両走行までのライフサイクルでのCO₂排出量(g-CO₂/km)は、原料輸送及び製造プラント内動

力から排出されるCO₂が大部分を占め、CO₂排出量の評価に大きな影響を与えることがわかった。

- (3) 各バイオマス燃料のライフサイクルでのCO₂排出量(g-CO₂/km)を軽油の場合と比べた場合、燃料製造プロセスの最適化によってはH₂で39.9%、DMEでは38.0%、FTDでは34.3%のCO₂削減効果が得られる可能性がある。

今後、木質以外の原料から製造されるバイオマス燃料の事例分析を行うとともに、自動車への燃料適用性及びGHG排出量を含めた総合的な環境負荷を評価する手法の確立に向け、調査研究を継続していきたい。

参考文献

- 1) 橋本征二, 小原卓巳, 寺島泰 (2000): 土木学会論文集VII, 37-48.
- 2) 社団法人 産業環境管理協会 (2012), 新CFPプログラム, 入手先<<http://www.cfp-japan.jp/>>, (参照 2012-6-23)
- 3) 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): “エネルギー・経済統計要覧”, 省エネルギーセンター, 224-225
- 4) 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
- 5) 岩手県林業技術センター(2005): 山土場からのチップの運搬工程 研究成果速報 No.171
- 6) 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: バイオマスからのFT軽油製造プロセスの効率化の検討. 産業技術総合研究所公表資料
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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, 17-24
- 10) 石井素 (2010): 交通安全環境研究所フォーラム 2009 講演概要集, 67-70
- 11) 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, 94