

LCA的視点に基づく移動体エネルギー供給時の環境負荷の考え方- Well to Wheel分析- *

A LCA approach to evaluate environmental burdens by supplying vehicle energy - Well to Wheel Analysis -*

工藤祐揮**・八木田浩史***・稲葉敦****

By Yuki KUDOH**・Hiroshi YAGITA***・Atsushi INABA****

1. はじめに

運輸は経済社会活動の基盤であり、現代の私たちの生活に必要不可欠である。その一方で、運輸においてはその移動体である交通手段によりエネルギーが大量に消費され、その結果として地球温暖化の原因物質であるCO₂や様々な大気汚染物質が排出されている。今後の持続可能な社会の構築に向け、石油依存度が98%¹⁾と他の最終エネルギー消費部門と比べて著しく高い運輸部門においては、CO₂排出量や大気汚染物質の制約や、化石燃料の可採年数に対する懸念とエネルギーセキュリティーの確保という観点から、エネルギー効率が高く、CO₂や大気汚染物質の排出減につながる様々な移動体技術の開発と導入が進められ、また、より輸送効率の高い移動体への転換を促し移動体需要の削減をもたらす様々な施策の導入が検討されている。

ライフサイクルアセスメント (LCA) とは、製品やサービス、社会システムのライフサイクル全体での環境負荷変化を定量化する手法であり、交通の分野においても環境負荷削減に資する各種対策のインベントリ分析やインパクト評価など、LCAの適用事例が数多く報告されている^{2),3),4)}。

移動体のエネルギー源の多様化とCO₂・大気汚染物質の削減に資すると考えられる対策の一つである非従来型

エネルギーの導入の中で、水素を燃料とする燃料電池は自動車やバス、非電化区間の鉄道や航空機のAPU (補助動力装置) としてなど、各種移動体への導入が幅広く期待されている。水素には炭素分が含まれないため、燃料電池で発電する際にCO₂の排出はないが、各種一次エネルギーや再生可能エネルギーから水素を製造・供給する段階ではCO₂が排出される。また現在の移動体のパワートレイン (動力装置) の主流である内燃機関でも利用できるバイオマス燃料は、炭素中立という、持続可能な形態で管理されているという暗黙の仮定が想定されており、また温室効果ガスの国家インベントリについて定めたIPCCのガイドラインに基づき、その燃焼に伴うCO₂排出は勘定しなくてもよいとされている⁵⁾。しかし、バイオマス燃料の製造・供給段階では、水素と同様に様々なエネルギーの投入に伴いCO₂が排出される。このような移動体での非従来型エネルギーの利用を考える際、移動体での需要が非従来型エネルギー製造・供給を誘発するというLCAの観点に立つと、その製造・供給段階での環境負荷も移動体側で計上されるべきである。

移動体燃料が一次エネルギーや再生可能エネルギーから製造・供給され、移動体、特に自動車で行走するために使用されるまでの一連のエネルギーチェーンサイクル全体での環境負荷を定量化する枠組みはWell to Wheel (WtW)分析と呼ばれ、内外で様々な分析が行われている。本発表ではこのLCA的な観点に基づくWtW分析関連文献のレビューを行うことで、移動体エネルギーのライフサイクル全体での環境負荷を評価する枠組についての検討を加える。

2. Well to Wheel 分析の概要

WtW分析は、今後の国家のエネルギー戦略や自動車メーカーやエネルギー産業の技術開発・経営戦略を練る上で重要であり、例えば、日本では財団法人石油産業活性化センター⁶⁾や経済産業省が実施する「水素・燃料電池実証プロジェクト」(JHFC: Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project) の総合効率検討特別委員会⁷⁾やトヨタ自動車株式会社・みずほ情報総研株式会社⁸⁾で、米

*キーワード: 移動体エネルギー、LCA、Well to Wheel分析

**正員、工博、産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター

(茨城県つくば市小野川16-1、

TEL029-861-8032、FAX029-861-8118)

***非会員、工博、産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター

(茨城県つくば市小野川16-1、

TEL029-861-5080ext.38975、FAX029-861-8195)

****非会員、工博、産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター

(茨城県つくば市小野川16-1、

TEL029-861-8145、FAX029-861-8195)

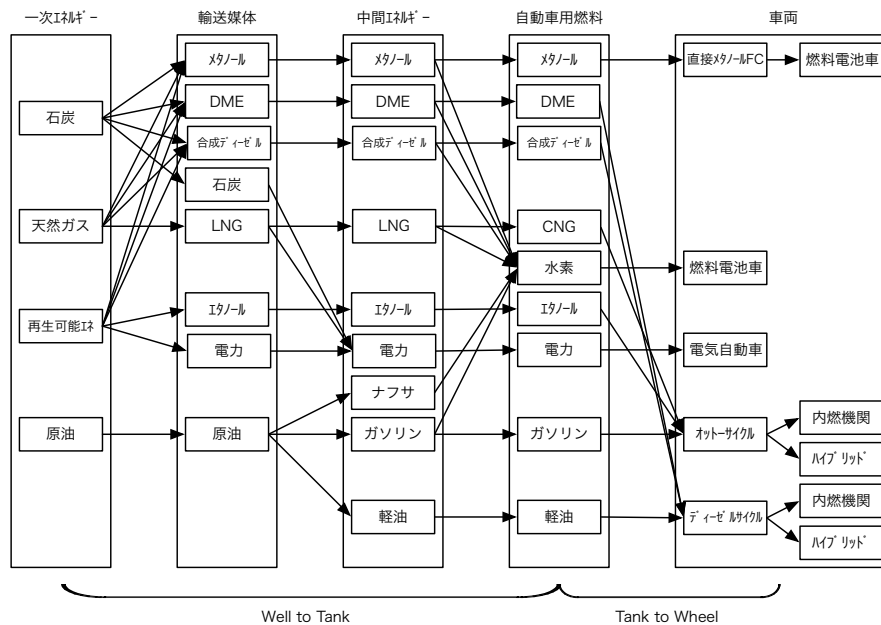


図- 1 Well to Wheel エネルギーチェーンサイクルの例

国ではGREET (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation) Model⁹⁾を用いたレポートなどで、また欧州では文献10)、11)などで実施した例が報告されている。

図- 1に、内外のWtW分析で検討対象とされている自動車用エネルギー供給パスと各種石油代替燃料自動車の組み合わせの一例を示す。WtWの一連のエネルギーチェーンサイクルのうち、一次エネルギー・再生可能エネルギーが採掘されてから自動車用燃料として精製され、自動車のタンクに搭載されるまでをWell to Tank (WtT)、搭載された自動車用燃料が走行に使用されるまでをTank to Wheel (TtW)と、分けて議論されることが多い。

それぞれのWtW分析で、分析対象とする地域によって様々な前提条件が異なっている。例えば、日本では天然ガスは海外からLNGとしてタンカーで輸入するのが通例であるが、欧州ではイギリス、オランダ、旧ソ連等で採掘された天然ガスを域内までパイプライン輸送して消費する割合が高い。また地域による電源構成についても、例えばアメリカでは発電量の50%以上を石炭火力が占める。さらに、TtW段階の自動車のエネルギー消費量すなわち燃費についても、日米欧それぞれで基準とする自動車燃料消費試験方法が異なるため、例え対象とする自動車の諸元が同じであっても、ある地域での燃費性能を他の地域で発揮できるとは限らない。したがって、ある地域での結果が他の地域にそのまま適用することはできないことに留意する必要がある。

以下に、WtW分析の主な前提条件についてまとめる。

- 日本の分析ではエネルギー消費とGHG（温室効果ガス）排出量を分析対象物質としている。GHGとして

はCO₂、CH₄、N₂Oを採用し、GWP（地球温暖化係数）を用いてCO₂換算しているが、化石燃料の燃焼に伴うCH₄およびN₂Oの排出量はないものとしている。

- 対象年度である2010年頃に実現・導入可能であると想定される自動車用燃料製造・供給技術と自動車技術を分析の対象としている。
- 想定するエネルギーチェーンサイクルには様々な不確実性が存在する。これは例えば輸送距離や一次エネルギーの採掘場所のような条件設定に基づくものや、将来の技術進歩などである。WtW分析ではこれらの想定される不確実性を考慮し、幅を持たせて評価している。したがってWtW分析の結果に大きな幅が含まれる場合、その解釈にあたってはその幅が生じる原因が何にあるのかに留意する必要がある。
- エネルギー消費を算出する場合の各物質の発熱量は、LHV（低位発熱量）を採用する。これは、TtW段階で想定する各種自動車の内燃機関の動作温度が高く、水蒸気の潜熱回収が難しいためである。
- WtW段階で想定されている各種エネルギー変換プロセスではエネルギーフローだけに着目し、これらプロセスの設備建設や運用に伴うエネルギー投入とCO₂排出量は分析対象外とする。電力について、汽力発電は設備建設・運用時のCO₂排出の寄与度が低いためにこれらをカットオフした、化石燃料燃焼に伴うCO₂だけをカウントしているが、発電時に燃料の燃焼がないためにCO₂が排出されない原子力、水力、太陽光、風力発電では、発電設備の建設や運用段階で排出されるCO₂を含めた発電源別CO₂排出原単位を用いる。

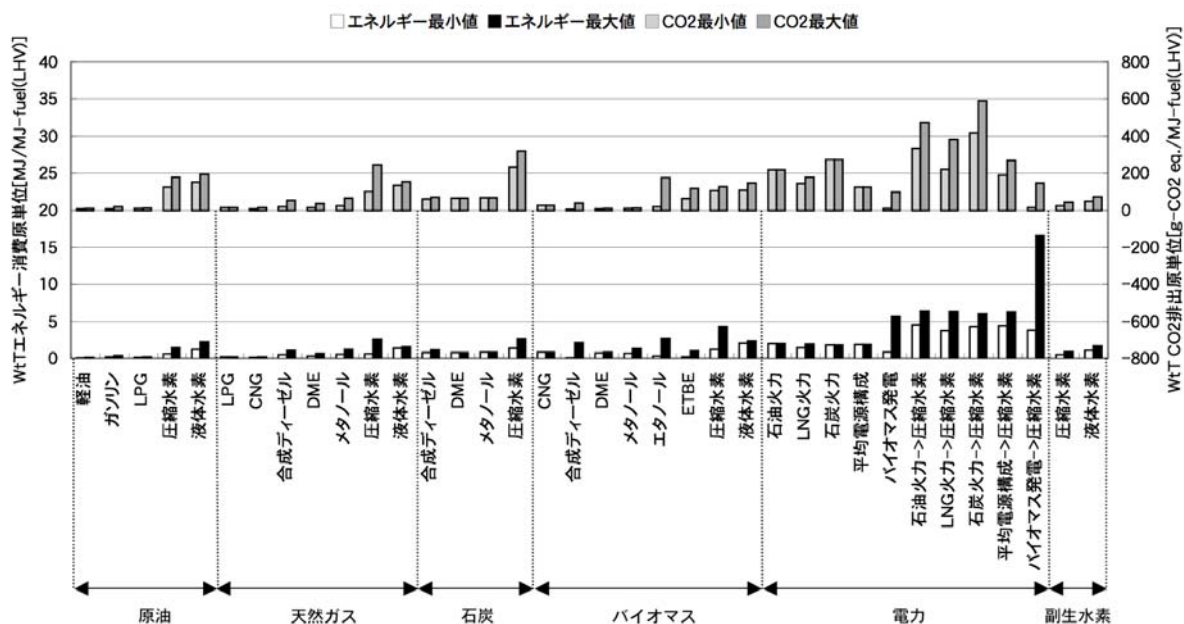


図- 2 Well to Tank エネルギー消費原単位・CO₂排出原単位の一例

- 各パスに含まれるプロセスでのエネルギー消費原単位は、生産物1単位あたり生産するために投入された原料およびエネルギーの発熱量の和として算出する。またCO₂排出原単位はプロセスでの炭素収支を考慮して、投入物のCO₂排出量の和と生産物のCO₂排出量の差として算出する。
- 自動車用燃料としての水素の製造・供給パスのうち、日本に特有なものとして、製鉄所におけるCOG（コークス炉ガス）に含まれる副生水素、苛性ソーダ工場からの副生水素の利用がある。副生水素のエネルギー消費原単位ならびにCO₂排出原単位は、以下の前提にしたがって算出している。すなわち、COGに含まれる水素や苛性ソーダ工場の副生水素は二次的な副産物であるとして捉えられるために、LCA的な観点からはエネルギー消費や環境負荷は配分されないと考えられる。これらの現在の利用用途のうち、基本的に燃料として利用されているものが自動車用燃料の水素として供出可能であるとし、その利用によるエネルギー消費量とGHG排出量は、燃料として代替燃料を利用した場合との差分によって定義されるものとする。
- TtW段階での自動車の燃費を定義する場合、例えば電気自動車の電池重量増加によりパワートレインの機械出力は増加するが、自動車としての機能が向上するわけではない。そこで、まず基準とする従来型の内燃機関自動車を決定し、分析対象とする自動車は自動車としての機能が基準車と等しくなるように自動車諸元値を設定する。

3. Well to Wheel分析結果の例

図- 2に、文献8)から作成した、日本の条件でのWtT エネルギー消費原単位・CO₂排出原単位を示す。ただし、バイオマス起源の自動車用燃料のCO₂排出量については、文献5)に基づいて整理し直した。以下にWtTエネルギー消費量・CO₂排出量についての主な論点を記す。

- 従来型燃料のエネルギー消費量・CO₂排出量は小さい。
- 非従来型燃料は、その供給途中段階に各種エネルギー変換プロセスが含まれるため、従来型燃料よりもエネルギー消費量・CO₂排出量が多くなる。
- 非従来型燃料の最大最小の幅が大きい。これは想定するエネルギーチェーンサイクルに含まれるエネルギー変換プロセスには様々な燃料合成法がありうることで、またそれらプロセスはまだ実証段階のものも含まれており、燃料の大量生産を行った場合のエネルギー消費量・CO₂排出量が変わりうるなどの、技術的不確実性が大きいためである。
- バイオマス燃料のエネルギー消費量は化石燃料起源のパスよりも多くなるが、炭素中立の考え方によりCO₂排出量は少なくなる。
- 水素はエネルギー消費量・CO₂排出量とも多くなる。特に水電解水素は発電効率の影響により想定される水素製造・供給パスの中でもそれらが多くなる傾向にある。ただ、LCA的な観点では二次的な副産物と見なされる副生水素は、それらが少なくなる。

次に、バスを対象としたWtW分析結果の例を図- 3に示す。対象としたバスは、2005年に開催された愛・地球博で長久手会場と瀬戸会場間で乗客輸送に使用された燃

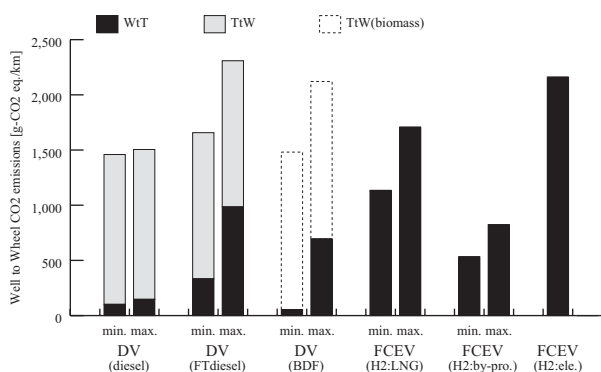


図-3 バスの Well to Wheel CO₂ 排出量

料電池バス(FCEV)ならびに、同一ルートを大型低床路線ディーゼルバス(DV)で試走した際のデータ¹²⁾である。ディーゼルバスの燃料としては軽油、天然ガス起源のFT軽油、BDFを、また燃料電池バスの燃料としては圧縮水素を仮定し、水素供給方法としては天然ガス改質水素(海外からLNGとして輸送され、国内で改質を行うバスのみを対象とした)、副生水素、日本の平均電源構成による水電解水素を選択した。ディーゼルバスを搭載する燃料で比較した場合、軽油よりも加工度の高いFT軽油はTtW段階でのCO₂排出量は少ないが、その効果はWtT段階のCO₂排出量増加に相殺され、WtW排出量で比較すると軽油を燃料とした場合よりも多くなる。またBDFを用いた場合には、TtW排出量(図-3の点線部分)はカウントしなくてもよいいため、WtW排出量は大幅に削減できる可能性がある。また燃料電池バスのTtW排出量はゼロであるが、WtT排出量がディーゼルバス用燃料よりも多いため、選択する水素供給バスによっては軽油を燃料とするディーゼルバスよりもWtW排出量が多くなる可能性があるとの示唆が得られる。なお、ディーゼルエンジンに関してはCO₂排出量だけでなく排気ガスによる人間影響などの問題もあるため、パワートレインとそのエネルギー選択にあたっては、排気ガスに含まれる物質も含めたインパクト評価を行う場合もある。

4. おわりに

本発表では移動体エネルギーのライフサイクル全体での環境負荷を評価する枠組であるWtW分析に焦点をあて、その基本的な考え方についてまとめた。またバスを対象としてWtW CO₂排出量を算出し、移動体パワートレインとその燃料選択を行う場合に留意すべき点を例示した。

本文中に記したように、WtW分析には様々な不確実性が含まれており、また現状では燃料コストを分析対象としていないため、こうした点が今後の移動体燃料の選

択に大きく影響しうることに留意されたい。

参考文献

- 財団法人省エネルギーセンター：EDMC/エネルギー・経済統計要覧(2005年版)
- Matsubishi, R., Kudoh, Y., Yoshida, Y., Ishitani, H., Yoshioka, M. and Yoshioka, K.: "Life Cycle of CO₂-Emissions from Electric Vehicles and Gasoline Vehicles Utilizing a Process-Relational Model", International Journal of Life Cycle Assessment, Vol.5, No.5, pp.306-312, 2000.
- 相原直樹, 辻村太郎: 「東海道新幹線のLCA手法による環境負荷の基礎的検討」, 鉄道総研報告, Vol.16, No.10, 2002.
- 加藤博和, 柴原尚希: 「公共交通整備計画評価へのLCA適用- 超電導磁気浮上式鉄道を例として - 」, 日本LCA学会誌, Vol.2, No.2, pp.166-175, 2006.
- 橋本征二, 南齋規介, 工藤祐揮, 森口祐一: 「バイオマス製品のLCAにおける資源採取とCO₂排出の取扱に関する基礎的検討」, 第1回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, pp.140-141, 2005.
- 財団法人石油産業活性化センター: 「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- 燃料電池車と既存自動車の比較 - 」, 2002.
- JHFC総合効率検討委員会: 「平成15年度「JHFC総合効率検討結果」中間報告書」, 2004.
- トヨタ自動車株式会社・みずほ情報総研株式会社: 「輸送用燃料のWell-to-Wheel評価 日本における輸送用燃料製造(Well-to-Tank)を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書」, 2004.
- Argonne National Laboratory: "The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation (GREET) Model", <http://www.transportation.anl.gov/software/GREET/index.html>
- General Motors, L-B-Systemtechnik GmbH, BP, Exxon Mobil, Shell and Total Fina Elf: "Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A European Study -", 2002.
- CONCAWE, EUCAR, JRC: "Well-to-Wheel Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context", 2005.
- JHFC: 平成17年度水素・燃料電池実証プロジェクト JHFCセミナー, 2006.