

長距離幹線輸送における 大型貨物車の低炭素化に関する検討

青木 孝成¹・室町 泰徳²

¹学生会員 東京工業大学 環境・社会理工学院(〒226-0026 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

E-mail: aoki.t.au@m.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院(〒226-0026 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

E-mail: muromachi.y.aa@m.titech.ac.jp

日本はパリ協定において、2030年までに2013年比でGHG排出量の26%削減を目指している。日本のCO₂排出量は、運輸部門が約2割を占め、そのうち貨物車が約3分の1を占めている。本研究では、長距離幹線輸送に用いられる大型貨物車のEV転換などによる低炭素化効果を、WtW分析の考え方に依拠しながら検討した。その結果、航続距離1000kmでは、想定上は可能なものの、バッテリー重量がGVWの約半分を占め、非現実的である可能性が高いことが示唆された。250km程度の航続距離であれば、バッテリー重量のGVWに対する比率は、2割程度に収まることがわかった。また、CO₂排出量の点では、ディーゼル車が全体として有利であり、これは日本は火力発電への依存度が高く、発電時のCO₂排出量が高いことが影響していることがわかった。

Key Words: 大型貨物車, 低炭素化, Well to Wheel 分析, 長距離幹線輸送

1. 研究の背景と目的

2015年のパリ協定において、日本は2030年度の温室効果ガス(GHG)の排出を2013年度の水準から26%削減することを目標としている。環境省¹⁾によれば、日本における2018年度のCO₂排出量のうち、17.8%にあたる2.0億tを運輸部門が占めており、さらに、その内の36.6%を貨物車が占めている。中でも長距離幹線輸送を担う大型貨物車の寄与は小さくないと考えられ、その対策が運輸部門における重要な課題となっている²⁾。

近年では、環境意識の向上や技術革新により、英仏やカリフォルニア州など、将来的に内燃機関(Internal Combustion Engine: ICE)による乗用車の販売中止を計画する国や地域も存在し、代替案としてのEVも市場に浸透し始めている。EV、特に、バッテリー電気自動車(Battery Electric Vehicle: BEV)はテールパイプの排出がゼロで、ストップアンドゴー時におけるエネルギーの一部を回収でき、都市内においてその特性が発揮されやすい。しかし、航続距離が短く、充電に時間を要するため都市間の長距離幹線輸送においては課題が大きい。また、経済性も課題であり、現在のところBEVへの転換はほぼ乗用車に限られる。

貨物車でもEVの試験的な導入が国内外で見られるが、都市内短距離輸送を主とする車両総重量(GVW)7.5t未満の貨物車が中心である。特に、日本は都市化率が高く、都市内輸送を担う小型貨物車が注目されがちであるが、海外では、長距離輸送を担う大型貨物車のEV化の検討も進められている。例えば、BYDやTeslaは36t級のBEVの大型貨物車の製造を構想している。一方、ToyotaとHino、Nikolaは燃料電池車(Fuel Cell Vehicle: FCV)ベースの大型貨物車の開発を行っている。大型貨物車の低炭素化に関する研究報告書の中には、長距離輸送を担う大型貨物車の経済性は、BEVが不利で、FCVや電気道路が有利との見方も示すものもある³⁾。

自動車の環境負荷を評価するにあたり、エネルギー供給フェーズまでを視野に入れた影響を考慮するWtW(Well to Wheel)分析の考え方が存在する。これは一次エネルギーからガソリンや電気などの自動車用エネルギー供給フェーズまでを考慮するWtT(Well to Tank)と、積載した自動車用エネルギーの使用フェーズを考慮するTtW(Tank to Wheel)で構成される。そして、エネルギー使用量やCO₂排出量を、両者の和と比較・評価することができるようになってきている。経済産業省は、2050年までに全ての車両をEVに転換し、1台あたりのGHGの約8割

を削減する「Well-to-Wheel Zero Emission」という目標を 2018 年に発表した⁵⁾。現状では、日本は電力の多くを火力発電に依存するため、EV 転換が低炭素化にあまり寄与しない点を示唆している。

こうした背景を受け、本研究では長距離幹線輸送における大型貨物車の低炭素化の検討を行った。特に、中型免許以上が必要となる車両総重量 7.5t 以上の貨物車を主な研究対象車両とする。また、長距離幹線輸送手段としては船舶なども考えられることから、本研究では貨物車の走行距離 1000km を目安とし、それ以下の走行距離の大型貨物車輸送を検討する。EV 転換などの低炭素化施策の効果を WtW 分析の考え方に基いて一次エネルギーまで遡って評価し、その他の要因とあわせて低炭素化の可能性を検討することとした。

2. 既往研究と本研究の位置付け

(1) 既往研究

大型貨物車の排出量を分析した主な既往研究としては、前述の WtW 分析を用いたものと運転サイクルシミュレーションを用いたものに大別される。

貨物車の WtW 分析として、カナダにおける BEV ベースの 36t トラックを分析した Sharpe⁶⁾の研究がある。まず、既存のバッテリー性能から、バッテリー容量と重量を推定し、前者を 1643kWh と算定している。その際、積載量はおおよそ 3 割圧迫され、このことが既存の内燃機関車との競争を厳しいものとするを明らかにしている。しかし、カナダでは水力発電の割合が大きいため、BEV 転換により CO₂ 排出量を約 1/6 に大きく低減できることも示している。Lee⁷⁾は、アメリカの各地域での中・大型トラックの FCV 転換効果を WtW 手法を用いて分析している。そして、ディーゼルから FCV への転換による化石燃料削減率は、18~34%の範囲であることを示した。さらに、高速運転が多い場合は、削減率が低下し、これは車両総重量にも影響されることが明らかにされた。また、削減率は地域の石炭火力などの依存率によっても左右されることを示している。

Wang⁸⁾は、代表的な WtW 分析ツールである GREET モデルを用いて、中国の乗用車に関する様々な一次エネルギーとその輸送経路による CO₂ 排出量を比較した。WtW は国内の状況を反映して製油所の効率が欧州よりも劣るよう設定し、TtW は EV が ICE の 1.5~2.5 倍の効率となるように設定している。結果、FCV によって ICE に比べ、WtW エネルギー消費量や CO₂ 排出量を約 40%削減できることが示された。また、液化水素の輸送が非常に非効率であり、主な課題である点も示している。Yazdanie⁹⁾は、スイスにおいてコストも含めた乗用車 E

V の WtW 分析を行った。全体として、WtW による CO₂ 排出量については、パワートレインよりも一次エネルギー供給経路が重要なことが示唆された。また、EV のコストは航続距離に対する感度が高く、現状の炭素税では、コストのギャップを埋めることができないと指摘している。さらに、再生可能エネルギーを用いた FCV は、環境負荷が著しく小さいが、水素の保存が技術的障壁となる点にも言及している。

運転サイクルシミュレーションを用いた研究では、主に JC08 などの燃費算定用の運転サイクルを外生的に与えて、転がり抵抗、空気抵抗、加速抵抗からエネルギー消費量を推定している。Guandalini¹⁰⁾は、BEV と FCV について、運転サイクル、車重、航続距離を複数組み合わせ比較し、長距離走行における BEV の不利と FCV の有利を、積載量の減少率などの点から示している。また、同時に関連した WtW 分析も行い、FCV は水素の生産の効率化が進んでいないため、CO₂ 排出量の観点から不利であることなども明らかにしている。国内では、中上¹¹⁾は、小型車の EV 転換による CO₂ 排出量削減率の定量化を行った。原子力を一次エネルギーとすることで、石油依存度を約 7 割削減できることが示されている。しかし、原子力の増加に制約をかけると、価格競争の結果、石炭火力が増加し、CO₂ 排出量削減効果が見られなくなることも示している。

(2) 本研究の位置付け

このように自動車の環境評価手法である WtW 分析の適用例は数多く見られる。しかし、大型車貨物車への適用例は比較的少なく、特に日本国内では数少ない。また、海外では大型貨物車の EV 転換の検討が進むものの、走行環境や輸送実態が異なるため、それらの結果をそのまま日本に当てはめることは困難である。

本研究は、火力発電の割合の高い日本国内において、主に長距離幹線輸送に用いられる大型貨物車の EV 転換などによる低炭素化効果を、WtW 分析の考え方に依拠しながら検討することを目的としている。

3. 道路交通センサスによる長距離トリップ分析

長距離幹線輸送を担う大型貨物車の走行実態の把握のため、平成 17 年道路交通センサスのオーナーマスターデータの分析を行った。以降は、全て拡大係数による補正済みの数値を示している。

乗用車を含めた自動車トリップ全体を対象に、トリップ長の分布の把握を行った。結果を図-1 に示す。棒グラフは各トリップ長のトリップ数を対数軸で表している。乗用車、貨物車ともにトリップ数では、100km 以下のト

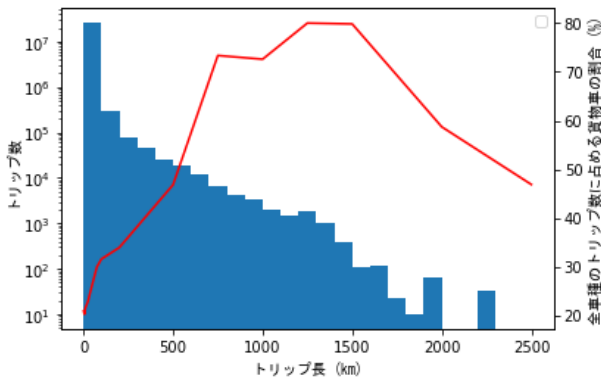


図-1 トリップ長の分布

リップが非常に多いことが確認できる。また、トリップ長が長くなると、トリップ数も減少していく。しかし、折れ線で示すように、全体に占める貨物車の割合は、トリップ長の増加に従って増加し、1000km では 70%以上となっている。

次に、1000km 程度の長距離トリップ長の分布を図-2 に示す。長距離全車は乗用車を含むすべての 1000km 以上のトリップ、長距離トラックは長距離全車のうち貨物車に絞ったもの、南関東-九州トラックは南関東と九州（沖縄を除く）との間の貨物車トリップ、南関東-福岡トラックは南関東-九州トラックのうち福岡に絞ったものである。トリップ OD に着目すると、長距離貨物車トリップでは、南関東と九州との間のトリップ割合が高いことが示された。当該 OD に関しては、船舶や鉄道といった輸送手段が考えられるものの、大型貨物車による長距離幹線輸送も想定できる代表的な OD であることが示唆された。したがって、本 OD を大型貨物車の長距離幹線輸送ケースとして想定することとする。

さらに同様の条件で、長距離貨物車トリップの輸送時間分布を分析した。結果を図-3 に示す。凡例は図-2 と同様である。東京と福岡との間のトリップでは、高速道路を休憩なしで利用したと仮定すると、およそ 14 時間かかる。この数値と、図-3 の数値を比較すると、長距離輸送全体では 20 時間と 40 時間に、南関東と九州の間では 35 時間付近にピークが見られ、全体的に余裕がある傾向が明らかとなった。理由として、睡眠を含めた休憩時間や納品のための時間調整、一般道利用が主に考えられる。特に休憩時間は、BEV の導入にあたり、充電時間に充てられる可能性がある。

最後に実際の積載量を把握する。BEV の導入においては、バッテリーの増設による重量増加によって、効率低下が懸念されている。図-4 は、最大積載量から実積載量を引いた重量分布を示しており、積載量の余裕を表している。値が小さいほど高効率輸送で重量の余裕がないことを示す。3t 付近にもピークは見られるものの、全体的に右肩下がり傾向で、バッテリーの増設の余裕は

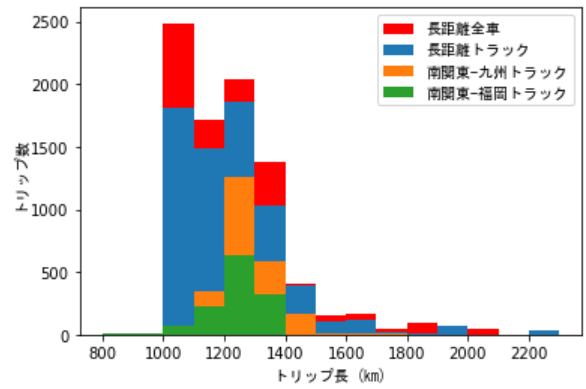


図-2 長距離トリップ長の分布

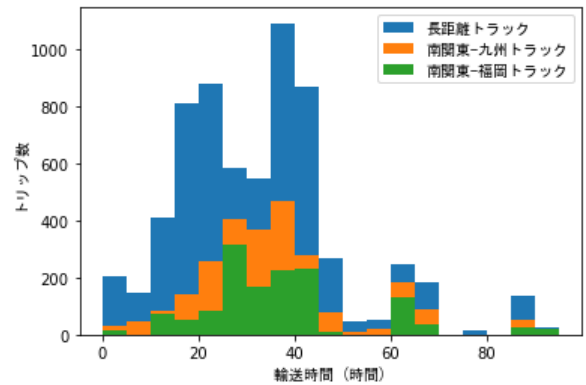


図-3 長距離貨物車トリップの輸送時間分布

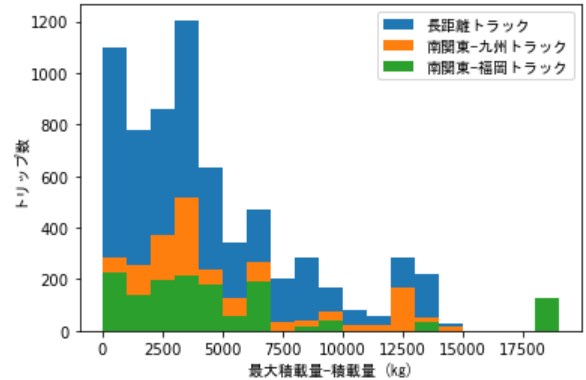


図-4 最大積載量-積載量の重量の分布

あまりないことが分かった。

4. 運転サイクルシミュレーションによる分析

中上ら¹¹⁾の研究を参考に、大型貨物車の運転サイクルシミュレーションを行い、BEV のバッテリー容量と重量、CO₂ 排出量原単位を推計した。まず、走行時のエネルギー W に注目し、これをタイヤの転がり抵抗と前面の空気抵抗と加速抵抗の時間積分から求める。なお、簡単のため、バッテリー以外の重量は一律で積載量分の重量とし、エンジンやモータなどのパーツの重量差は考慮しない。また、BEV での回生エネルギーは、加速抵抗

の式に基づき、減速時に 4 割回収するものとした。さらに比較のため、ICE であるディーゼル車も比較検討した。

$$R = \frac{(R_{roll} + R_{air} + R_{accel})}{\lambda_g} \quad (1)$$

$$R_{roll} = \mu_r(GVW + battery)g \quad (2)$$

$$R_{air} = \frac{\rho}{2} C_d A v_t^2 \quad (3)$$

$$R_{accel} = (1 + \sigma)(GVW + battery)\alpha_t \quad (4)$$

$$W = \frac{1}{\eta_e} \int_0^t v_t R dt \frac{mile_{target}}{mile_{cycle} SoC} \quad (5)$$

ここで、 R は走行抵抗、 R_{roll} は転がり抵抗、 R_{air} は空気抵抗、 R_{accel} は加速抵抗、 λ_g は勾配係数、 μ_r は転がり抵抗係数、 $battery$ はバッテリー重量、 g は重力加速度、 ρ は空気密度、 C_d は空気抵抗係数、 A は前面面積、 v_t は速度、 α_t は加速度、 σ は回転部分相当重量係数、 η_e は電気変換効率、 $mile_{target}$ はバッテリーの航続距離、 $mile_{cycle}$ は運転サイクルの走行距離、 SoC は電池の放電深度である。

推計にあたり、パラメータは表-1 の通り設定した。車両パラメータは既往文献の数値を参考に設定し、排出係数とエンジン効率は環境省¹²⁾と国土交通省¹³⁾で示された数値を設定した。特に BEV において、電気の排出係数は大手電力会社 10 社の値を参考にして、火力発電の比率の高い全電力平均を反映し、WtT の考え方を取り入れたものになっている。

さらに、シミュレーションにあたり、以下のパターンを設定した。GVW は、中型と大型の車両を想定して 15t、25t とした。また、本シミュレーションでは、積載量を満載と仮定している。航続距離 E_{mile} は、長距離としての距離 1000km と、既往文献やメーカーのベンチマークで示される距離 250km を想定して設定した。さらに、運転サイクルをシャシダイナモ試験で用いられるものに統一し、国際的に最も一般的な WLTP、大型貨物車向けに設定されたアメリカの EPA による HDUDDS、欧州の FIGE の 3 種を用いた。

以上の条件における分析の結果を図-5、図-6 に示す。まず、航続距離を 1000km に設定することは、想定上は可能なものの、バッテリー重量が GVW の約半分を占めて不経済となり、非現実的である可能性が高いことが示唆された。一方、250km 程度の航続距離であれば、バッテリー重量の GVW に対する比率は、2 割程度に収まる。ただし、バッテリー技術の進展により今後はより経済性が好転することが予想される。

次に、CO₂ 排出量を示す。図-6 は 15t 車の貨物満載での WtW の CO₂ 排出量原単位を表したものである。ディーゼル車が、全体として有利な結果となり、これに対し

表-1 シミュレーションのパラメータ設定

勾配係数 λ_g	0.95
転がり抵抗係数 μ_r	0.01
空気密度 ρ (kg/m ³)	1.225
前面面積 A (m ²)	7
回転部分相当質量係数 σ	0.7
空気抵抗係数 C_d	0.8
電気変換効率 η_e	0.8
最大 SoC(%)	80
回生エネルギー回収率(減速時)(%)	40
電気の排出係数(kg-CO ₂ /kWh)	0.462
バッテリー密度(kWh/kg)	0.2
ディーゼルエンジン効率(目標値)	0.5
軽油の排出係数(kg-CO ₂ /kWh)	0.246

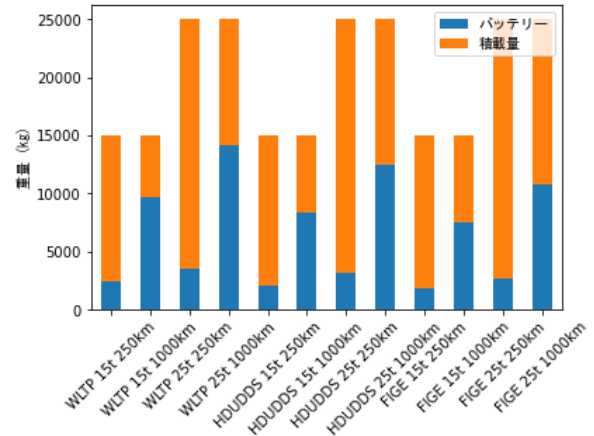


図-5 GVWに占めるバッテリーの重量割合

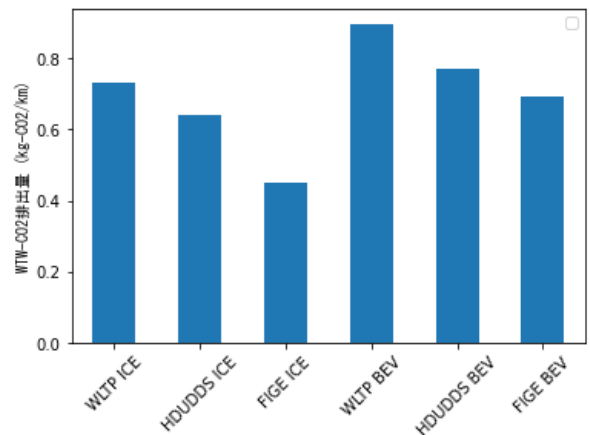


図-6 1000km 貨物輸送時の CO₂ 排出量

て BEV は 2~5 割増となった。日本は火力発電への依存度が高く、発電時の CO₂ 排出量が高いことが影響している。そのため、現状では BEV の導入は低炭素化に貢献しないことが確かめられた。ゆえに、長距離幹線輸送におけ

る大型トラックの EV 化を図る上では、発電の低炭素化、特に再生可能エネルギーの導入が不可欠と言えるであろう。

5. おわりに

本研究は、長距離幹線輸送に用いられる大型貨物車の EV 転換などによる低炭素化効果を、WtW 分析の考え方に依拠しながら検討した。その結果、航続距離 1000km では、想定上は可能なものの、バッテリー重量が GVW の約半分を占め、非現実的である可能性が高いことが示唆された。250km 程度の航続距離であれば、バッテリー重量の GVW に対する比率は、2 割程度に収まることがわかった。

また、CO₂ 排出量の点では、ディーゼル車が全体として有利であり、これは日本が火力発電への依存度が高く、発電時の CO₂ 排出量が高いことが影響しているためであることが分かった。長距離幹線輸送における大型トラックの EV 化を図る上では、発電の低炭素化、特に再生可能エネルギーの導入が不可欠である。

謝辞：本研究では、国土交通省より道路交通センサスデータをご提供頂きました。ここに謹んで謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省：2018 年度（平成 30 年度）の温室効果ガス排出量（確報値）について，2020
- 2) 国土交通省：大型車の長期的な低炭素化に向けた勉強会，https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr10_000042.html，2020 年 9 月 20 日アクセス
- 3) International Transport Forum, Towards Road Freight Decarbonisation Trends, Measures and Policies, 2018
- 4) Transportation Research Board, Reducing Fuel Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Medium- and Heavy-Duty Vehicles, Phase Two: Final Report, 2020
- 5) 経済産業省：Japan Promotes Electrified Vehicle (xEV) Strategy ahead of 2050，<https://www.meti.go.jp/english/mobile/2018/20180911001en.html>，2020 年 9 月 28 日アクセス
- 6) Ben Sharpe: Zero-emission tractor-trailers in Canada, International Council on Clean Transportation, WORKING PAPER 2019
- 7) Dong-Yeon Lee, Amgad Elgowainy, Andrew Kotz, Ram Vijayagopal, Jason Marcinkoski: Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium- and heavy-duty trucks, Journal of Power Sources Volume 393, Pages 217-229, 2018
- 8) Michael Wang: Fuel choices for fuel-cell vehicles: well-to-wheels energy and emission impacts, Journal of Power Sources Volume 112, Issue 1, 24 October 2002, Pages 307-321
- 9) Mashael Yazdanie, Fabrizio Noembrini, Steve Heinen, Augusto Espinel, Konstantinos Boulouchos: Well-to-wheel costs, primary energy demand, and greenhouse gas emissions for the production and operation of conventional and alternative vehicles, Transportation Research Part D: Transport and Environment Vol. 48, Oct 2016, pp 63-84
- 10) Giulio Guandalini, Stefano Campanari: Well-to-wheel driving cycle simulations for freight transportation: battery and hydrogen fuel cell electric vehicles, 2018 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive
- 11) 中上聡, 山本博巳, 山地憲治, 高木雅昭, 岩船由美子, 日渡良爾, 岡野邦彦, 池谷知彦：車種別利用パターンを考慮したプラグインハイブリッド車と電気自動車の導入評価，エネルギー・資源学会論文集 2010 年 31 巻 6 号 p. 7-15
- 12) 環境省：算定方法・排出係数一覧，<https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc>，2020 年 8 月 24 日アクセス
- 13) 国土交通省：次世代大型車開発・実用化促進プロジェクト，<https://www.mlit.go.jp/common/001288096.pdf>，2020 年 8 月 24 日アクセス

(Received October 2, 2020)