

ライフサイクル CO₂ 排出量の在来線車種別評価

相原 直樹* 森本 文子** 辻村 太郎*

Evaluation of Life Cycle CO₂ Emissions by Various Types of the Meter Gauged Railway Vehicle

Naoki AIHARA Fumiko MORIMOTO Taro TSUJIMURA

The CO₂ emissions in the case of operating around three vehicle types of a conventional type internal combustion car, a new type internal combustion car, and a standard electric car for 60 years on a local line were calculated. Operation energy was calculated based on the simulation of vehicles and track conditions. Moreover, the CO₂ emissions discharged in the process of manufacture and maintenance of equipment required for operation of a train were calculated. As a result, a standard electric car had the minimum in the whole amount of discharge, although the CO₂ emission accompanying vehicle manufacture was the maximum among three vehicle types.

キーワード：ライフサイクルアセスメント，インベントリ分析，在来線，運行エネルギー

1. はじめに

鉄道等運輸機関において、今後、二酸化炭素 (CO₂) 等の温室効果ガスの削減をさらに進めようとする場合、これを効果的に実施するためには、各運輸機関の各構成要素の製造から処分までのライフステージにおいてライフサイクルアセスメント (LCA) を実施し、何が主要な排出要因であるかを特定する必要がある。例えば、東海道新幹線や山手線のように運行頻度の高い、または、高速で運行する路線では、運行エネルギーの消費による CO₂ 排出量が全体の9割程度であり、これが主要な排出要因となっている^{1) 2)}。一方、運行頻度の比較的低いローカル線では、ライフサイクルにおける運行エネルギーの消費量が小さい。従って、構造物、車両等のインフラストラクチャーの整備、メンテナンスにおける CO₂ 排出量のライフサイクル全体に対する比率が上がるが見込まれる。

このように、ライフサイクルにおける CO₂ 排出量を減らすに当たり、ターゲットとすべき構成要素が変わることを意味する。

そこで、今回、実際のローカル線にて様々な種類の車両を運行した場合、ライフサイクルでどれだけの CO₂ が排出されるか、また、他種車両とどの程度の差があるかについて、ライフサイクルアセスメントのケーススタディを行った。また、運行エネルギーの消費量についてはシミュレーションを実施したので報告する。

2. 算出対象及び範囲

対象とする路線は、表1に示す現行路線の一つであるローカル線Aとした。同線において従来型気動車 (現行車種)、新型気動車、標準型電車の3種の車両を60年間走行させたケースについて比較した。各車種の主な仕様を表2に示す。CO₂ 排出量は、①運行エネルギー消費、②必要となる車両の製造、③新たに整備すべき構造物 (標準型電車のみ) について算出した。なお、今回の評価では、3種の車両の運用による CO₂ 排出量の差を把握することを主な目的とし、現在使用されている固定構造物 (線路、トンネル、橋梁等) の整備に関する CO₂ 排出量は算出範囲から除外した。

上記②③について、算出対象を表3に示す。標準型電車は電車線及び変電所一基の増設をするものとした。その他、軌道の改良、信号通信機器等の変更も行われるが、今回の計算では省略した。

表1 ローカル線Aの概要

電化の有無	全線非電化
路線長	20.268km
複線化率	全線単線
在籍車両数	8両
運行本数	18往復 (2010年4月時点)
編成両数	1～3両
年間車キロ数	50万 km

* 材料技術研究部

** 材料技術研究部 摩擦材料研究室

特集：材料技術

表2 車両の主な仕様

種別 仕様	従来型 気動車	新型 気動車	標準型 電車
製造年	1977～ 1982	2007～	1995～
重量 (t)	37.6	38.7	31.0

表3 車種別の算出対象

種別 対象	従来型 気動車	新型 気動車	標準型 電車
車両	○	○	○
電車線	×	×	○
変電所	×	×	○

3. 車両走行時の環境影響評価

3.1 CO₂ 排出係数

車両走行時のCO₂排出量の算定に用いたCO₂排出係数は以下のとおりとした。

- ・軽油のCO₂排出係数は、環境省が2010年3月に各種算定・報告・公表制度に向けて提示³⁾した2.58kg-CO₂/ℓを使用した。
- ・電力消費のCO₂排出係数は対象路線を有する鉄道事業者の2006年～2008年の実績値である0.355kg-CO₂/kWhを使用した。

電力消費のCO₂排出量については、地球温暖化対策推進法に基づく温室効果ガス排出量の算定・報告・公表制度において、電力によるCO₂排出係数のデフォルト値は0.555kg-CO₂/kWhとなっている。また、この制度では、一般電気事業者（10電力会社）及び特定規模電気事業者（PPS）の事業者ごとの排出係数について、環境大臣・経済産業大臣が公表している場合には、これを用いて排出量の算定を行うことができることとなっている。ただし、今回はローカル線Aにて実際に電車が運行された場合を想定したため、実績値である0.355kg-CO₂/kWhを用いた。

3.2 走行エネルギー算出方法

走行エネルギーの算出には、鉄道総研で開発したディーゼルハイブリッド車両用走行シミュレータ⁴⁾を用いた。図1にその構成を示す。当該システムは、線路や車両等の条件を用いて運転曲線作成システム Speedy⁵⁾により運転曲線を作成し、車両モデルにより消費エネルギーを算出するものである。ディーゼルハイブリッド車両用に開発されたシステムではあるが、気動車および電車への適用も可能である。

入力する線路条件および走行条件は、対象路線の線路平面図および現行の運転曲線図をもとに設定した。車両重量、最高速度等の車両条件は各車種に応じて設定し、乗車人数は、2004年から2007年における民鉄の地方旅客鉄道の全国平均値を鉄道統計年報^{6) 7) 8) 9)}から算出し、これを参考に全車種で共通に1両あたり20人とした。

車両モデルには、車種ごとに必要に応じてエンジン、変速機、モータなどの各機器の特性を設定した。なお、対象路線の運行頻度は一時間に1本程度であり、ローカル線A内での力行と回生のタイミングが一致する確率が低いと見込まれるため、標準型電車のブレーキ時における電力回生は考慮しないこととした。なお、ローカル線Aは独立した路線でなく、別の電化路線と接続している。従って、この路線と併せて考えれば一定の電力回生は見込まれるが、今回はこれも考慮しないこととした。また、入力条件のうち補機に関するデータに不明な部分があったため、全車種において補機電力および補機トルクは設定せず、比較条件を揃えた。ただし、空調装置の影響については後述の3.4のとおりシミュレーションとは別に簡略化して算出することとした。

このシミュレータにより、対象車種それぞれに対して運転曲線を作成し、走行エネルギーを求めた。運転曲線作成の際には、計算される運転時分が、対象路線における現用の運転曲線図に記載された運転時分に可能な限り近づくようにした。実際には、車種により加減速度が異なるため、最適な運転曲線も変わってくるが、この評価

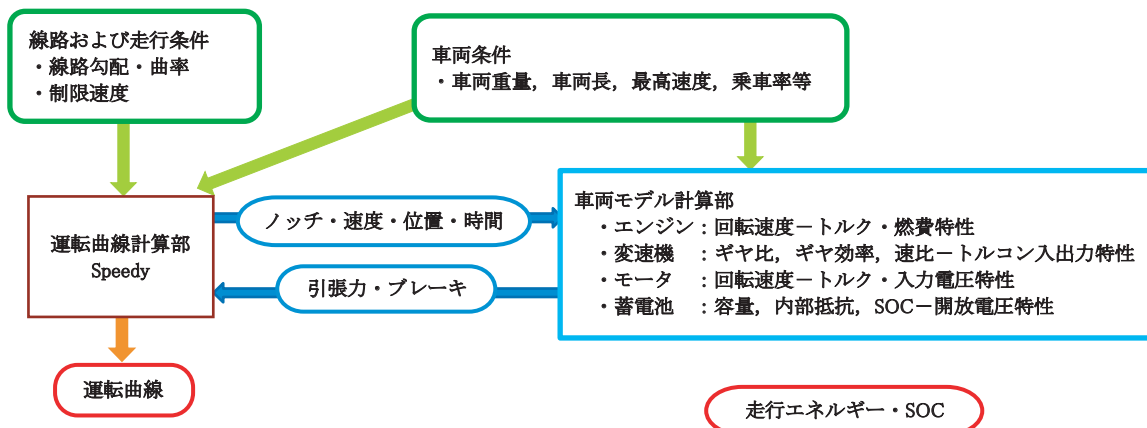


図1 ディーゼルハイブリッド車両用走行シミュレータの構成

では同じ運転曲線での差を把握することとした。従って、実際に新型気動車、標準型電車に置き換えた場合の所要時間及びエネルギー消費量とは若干異なる。なお、各駅における停車時分は30秒間とした。

3.3 走行エネルギー算出結果

1往復あたりの各車種の走行エネルギーの算出結果を編成両数別に表4に示す。表5に、対象路線の一日あたり編成両数別往復数を用いて積算した車種別の年間の走行エネルギーと、対応するCO₂排出量を示す。これは、走行エネルギーに3.1節に示した係数を乗じて得られる。

なお、補機のエネルギーを除いた分、全車種で走行エネルギーは実際より低く見積もられている。駆動用エンジンにおいて補機トルクを除いた影響は、従来型気動車に比べて新型気動車で大きい。このため、新型気動車では従来型気動車に比べると燃料消費量がより少なく評価されていると推察される。

表4 1往復(40.536km)の車種別走行エネルギー

編成	従来型 気動車	新型 気動車	標準型 電車*
1両	33.6ℓ	16.4ℓ	43.0kWh
2両	64.9ℓ	31.9ℓ	83.6kWh
3両	96.5ℓ	47.5ℓ	121.8kWh

※回生ブレーキは考慮していない。

表5 年間走行エネルギーと年間CO₂排出量

	従来型 気動車	新型 気動車	標準型 電車*
年間走行 エネルギー	399kℓ	196kℓ	512MWh
年間CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)	1028	506	182

※回生ブレーキは考慮していない。

3.4 空調装置の考慮

上記の走行シミュレーションにおいて空調装置の使用によるエネルギー消費を考慮するには、電車の場合には

補機電力を、気動車のうち走行用エンジンをその動力源とする場合には補機トルクの特性を設定する。補機用のエンジンを走行用エンジンとは別に搭載した気動車の場合には、その分のエネルギー消費を別途加算する。しかし、今回の評価においては、簡略化のため、対象車種のうち1車種の空調装置の定格能力からシミュレーションとは別にCO₂排出量の推定を行い、一律に全車種に適用することにより、空調装置の使用を考慮したものとみなした。なお、気動車の暖房時については、エンジンの冷却水を活用しているため負荷は殆どなく、本方法では空調によるエネルギーはやや過大に見積もっている可能性がある。

今回は、空調装置をAU732(33,000kcal/h)一台とし、定格能力の50%で、6月から9月の夏季および12月から3月の冬季に使用すると仮定してCO₂排出量を推定した。一日あたりの空調使用時間は、運用の間合いや駅での停車時間も含めた車両の延べ運用時間とした。表6に結果を示す。

この推定値を全車種に一律に適用して算出した、対象

表6 空調装置の使用によるCO₂排出量の推定

装置	形式	定格出力
冷房	AU732 × 1台	38.4kW
暖房	電気暖房器 + 空調ヒーター	19.8kW
年間平均消費電力※：19.8kW		
年間消費電力量：240MWh		
年間CO ₂ 排出量：85.2 t-CO ₂		

※定格出力の50%を消費電力と仮定し、夏季・冬季で各4カ月使用することとした。

表7 空調を考慮した走行時60年間CO₂排出量
(単位：t-CO₂)

空調の考慮	従来型 気動車	新型 気動車	標準型 電車*
なし	61,680	30,360	10,920
あり	66,780	35,460	16,020

※回生ブレーキは考慮していない。

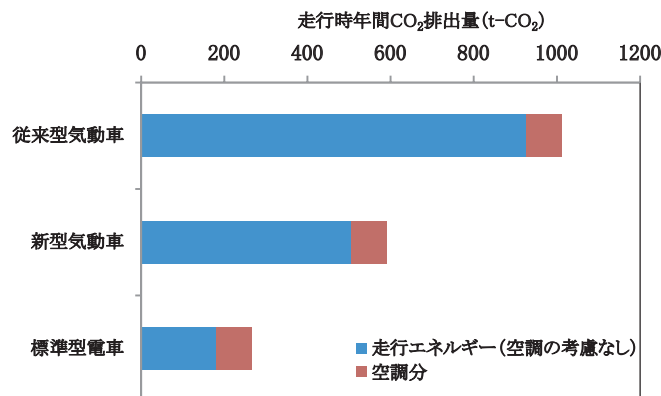


図2 空調を考慮した走行時の1年間CO₂排出量

特集：材料技術

表8 対象路線における従来型気動車の燃費の実績値と計算値の比較

車両形式	上下別	燃料消費量 (ℓ/両)	燃費計算値 (km/ℓ/両)	燃費実績値 (km/ℓ/両)	計算値/実績値
従来型 気動車 X	上り	16.6			
	下り	13.3			
	往復	29.8	1.36	1.4	0.97
従来型 気動車 Y	上り	14.4			
	下り	11.3			
	往復	25.7	1.58	1.6	0.99

走行距離：40.536km/往復

路線における60年間CO₂排出量を表7に、1年間のCO₂排出量をグラフ化したものを図2に示す。車種により異なるが、走行時CO₂排出量に占める空調による割合は8%から38%となった。

3.5 シミュレーションの妥当性の確認

走行シミュレーションの妥当性を確認するため、対象路線において従来型気動車X及びYの2車種で実測された燃費データを、測定時を模擬した走行条件下でのシミュレーション結果と比較した。燃費測定時は、空調装置を取り外した状態で行われたため、車両重量は36tとした。また、駆動用エンジンの補機トルクを考慮した。結果を表8に示す。

従来型気動車X、Yともに計算値と実績値は十分近い値を示した。前節の5車種に対するシミュレーションでは、一部仮定値を用いている、補機を考慮していない等の計算条件の違いがあるため、他の車種においても計算の信頼度が同程度であるとは言えないが、概ね実態を反映していると考えられる。

4. 車両製造及び構造物整備の評価

4.1 車両の製造及びメンテナンス

車両の製造に伴うCO₂排出量は、JR東日本のE231系車両の製造時のCO₂排出量の結果²⁾を基本とし重量按分を行うことで算出した。これは、鉄系金属が重量比で大きな割合を占めること、及び、床材についてもCO₂排出量原単位が鉄系金属と近い値となることによるものである。

全編成の車両数は8両とし、寿命は一律20年とした。すなわち、60年間において、1年目、21年目、41年目に新しい車両が投入されることとした。

車両のメンテナンスの内容及び頻度は、走行キロ数及び法令での上限年数を確認の上で、E231系車両と同一とみなした。

表9にE231系車両（一両平均重量25.5t）の1両あたりの算出結果を示す。

表9 E231系車両の1両あたりの製造及びメンテナンスにおけるCO₂排出量

プロセス	ステージ	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)
		20年あたり
製造	材料投入	45,644
	エネルギー消費	8,935
メンテナ ンス	材料投入	2,824
	エネルギー消費	120,499

上表を元に、例えば、標準型電車を8両、60年間で3回製造したときのCO₂排出量は以下のように計算した。

$$\begin{aligned}
 (\text{製造時CO}_2\text{排出量}) &= \\
 (45.644+8.935) \times (31.0/25.5) \times 8 \times 3 \\
 &= 1592 \text{ (t-CO}_2\text{)}
 \end{aligned}$$

3種の車両の60年あたりのCO₂排出量を表10に示す。

表10 車両製造及びメンテナンスにおけるCO₂排出量
(60年あたり、単位：t-CO₂)

車種	従来型 気動車	新型 気動車	標準型 電車
車両製造	1,931	1,988	1,592
車両 メンテナンス	2,960		

4.2 電車線

標準型電車を走行させるのに必要な電車線は、JR東日本のE231系車両の製造時のCO₂排出量で算出した山手線用インテグレート架線の結果²⁾を基本とし、以下の調整等を行った上で、全線に新設するものと仮定して算出した。

- ・複線の部分を単線の値にした。また、ローカル線Aへの適用に相応しくなるように、架線柱等、一部の部品を変更した。
- ・メンテナンスについては頻度が不明のため、既評価の山手線の結果²⁾を適用した。

・工事に伴う燃料消費は、CO₂排出量が僅少と見込まれるため省略した。

以上の条件により、ローカル線Aを電化するための全製品の製造に伴うCO₂排出量は547t-CO₂となった。また、これらの製品のメンテナンスによる交換に伴うCO₂排出量は、60年間で433t-CO₂となった。すなわち、60年間で合計980t-CO₂の排出となった。

4.3 変電所

標準型電車を走行させるのに必要な変電所については、既存のローカル電化路線の変電所の規模のものが1つ必要と仮定することとした²⁾。なお、今回の計算では、変電所における電気設備に関するCO₂排出量の算出とし、設備が収納される建屋等の建設に関しては省略した。また、電車線に供給するための電力ケーブルも必要となるが、これも重量的には比較的少ないことから計算を省略した。

変電所の寿命は30年とした。すなわち60年間においては、1年目と31年目に同じものを2度建設することとした。

これらの条件に基づく計算により、変電所については

初期建設及び31年目更新時にそれぞれ114tのCO₂が排出されることがわかった。すなわち、60年間では228tとなった。

5. 計算結果のまとめ

以上までの計算結果をまとめたものを表11及び図3、4に示す。これらより以下のことがわかった。

(1) 合計の値は、標準型電車のCO₂排出量が最も少な

表11 ローカル線Aにおける各種車両別のCO₂排出量 (60年間, 単位: t-CO₂)

種別	従来型気動車	新型気動車	標準型電車*
運行エネルギー	61,690	30,350	10,910
空調	5,110	5,110	5,110
車両製造	1,931	1,988	1,592
車両メンテ	2,960	2,960	2,960
電車線	—	—	980
変電所	—	—	228
合計	71,691	40,408	21,780

※再生ブレーキは考慮していない。

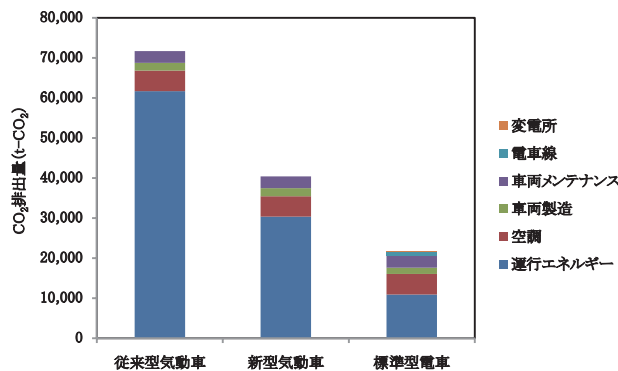


図3 各種車両及びインフラストラクチャーの60年間のライフサイクルCO₂排出量

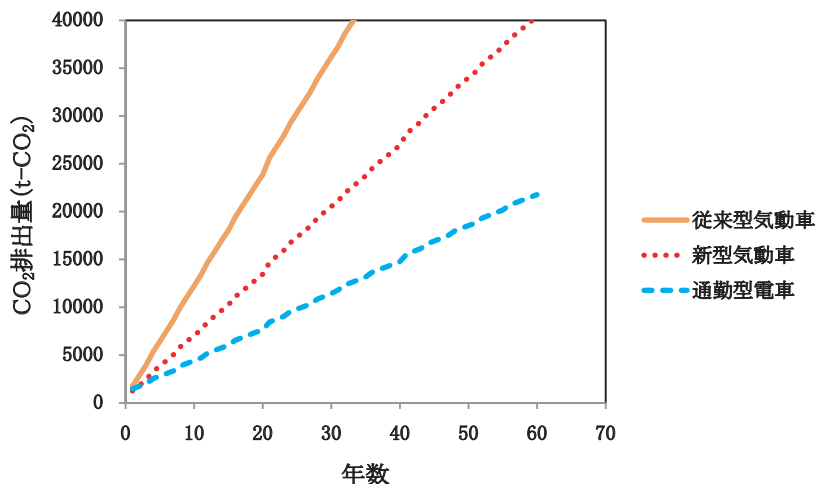


図4 60年間のライフサイクルにおけるCO₂排出量の推移

特集：材料技術

かった。

- (2) 対象とした路線について18往復/日と比較的低頻度の条件で算出したため、運行エネルギー消費によるCO₂排出の比率が比較的低かった。
なお、以下の点に注意する必要がある。
- (3) 今回の計算では標準型電車にて回生ブレーキを使用しない条件で計算している。実際には回生ブレーキが使われる可能性もあるため、その分排出量が若干減少する可能性がある。
- (4) 空調のエネルギー消費に伴うCO₂排出量、車両メンテナンス時のCO₂排出量については概算であり、目的によって再計算の必要が生じることがある。

6. まとめ

- (1) 非電化ローカル線を対象とし、従来型気動車、新型気動車、標準型電車の3車種を60年間運行させる場合の、消費エネルギー及び必要となる車両の製造、構造物の整備についてライフサイクルアセスメントのケーススタディを実施した。
- (2) 上記の結果より、標準型電車は、運行するために電車線等のインフラストラクチャーを必要とするものの、運行エネルギーの少なさにより、ライフサイクルCO₂排出量としては最少となった。

文献

- 1) 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, pp.13-18, 2002.10
- 2) 渡部哲至, 佐竹渉, 植原健治, 辻村太郎, 相原直樹: 山手線の設備におけるLC-CO₂の検討, 平成21年電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp.343-346, 2009
- 3) 環境省: 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧, pp. II -216, 2010
- 4) 中村英男, 近藤稔, 村上浩一, 小川知行, 熊澤一将, 山下修: ディーゼルハイブリッド車両用運転シミュレータの開発, 鉄道総研報告, Vol.25, No.1, pp.37-42, 2011
- 5) 平野純一, 富井規雄, 山下修: 運転曲線作成システムSPEEDYの作成, RRR, Vol.49, No.5, pp.9-14, 1992
- 6) 国土交通省鉄道局: 鉄道統計年報 平成16年度, 政府資料等普及調査会, 2006
- 7) 国土交通省鉄道局: 鉄道統計年報 平成17年度, 政府資料等普及調査会, 2007
- 8) 国土交通省鉄道局: 鉄道統計年報 平成18年度, 政府資料等普及調査会, 2008
- 9) 国土交通省鉄道局: 鉄道統計年報 平成19年度, 電気車研究会, 2009