

鉄道とエネルギー

公益財団法人 鉄道総合技術研究所 研究開発推進室 主管研究員

辻村 太郎

1. はじめに

人や物を移動させる輸送機関である鉄道にとってエネルギーは必要不可欠である。鉄道の輸送サービスを顧客に提供するために、エネルギー、資源、そして人材とノウハウを投入し、アウトプットとしては輸送サービス以外に環境への負荷も発生している。鉄道の輸送サービスには、安全であること、安定していることと価格や快適性などの面での顧客のニーズに適合していることが求められる。さらに、事業として継続していくためには、経済的な側面に加えて、社会の多様化するニーズにも対応していかななくてはならない。

エネルギーは経済的な発展にリンクして消費量が増大する傾向があり、近年のBRICs(ブラジル、ロシア、インド、中国)を始めとする世界各国の経済発展に伴い世界のエネルギー需要が急増する一方で石油生産がピークを迎え、その後減少していくピークオイルと言われる状況についての議論が活発化するなど、今後のエネルギー需給の動向に注目が集まっている。さらに、一次エネルギーの自給率が原子力(約16%)を加えても2割以下である我が国の状況を考えると、エネルギーの安定供給リスク、エネルギー価格の変動リスクへの対応は重要な課題である。

地球環境問題の観点からは、提唱されている循環型社会、低炭素社会への対応が求められ、二酸化炭素(CO₂)をはじめとする温室効果ガスの排出量の中長期的な削減目標の設定が国際的に議論されている。国内においても各分野の具体的な課題としての検討が行われ、定性的な方向性・施策の提案や削減目標の試算例が公表されている。

これらの課題への共通する回答の一つとして、できるだけ少ないエネルギー消費で輸送サービスが提供できるようにすること、鉄道としての省エネルギーがある(図1参照)。ここでは、我が国におけるエネルギーの消費の状況の変遷を振り返る。次に、鉄道については主に1990年以降の変遷についていくつかの事例を挙げて検討し、課題を整理し、今後の方向性について述べる。

最初にも述べたようにエネルギー消費は、温室効果ガスの排出とも密接に関係している。しかし、電力のCO₂原単位は、そのエネルギー構成や発電設備の性能によって大きく異なり、各電力会社による違いや、また各年度によって変動しているのが実情である。現時点では鉄道が一次エネルギーのあり方について主体的に取り組む状況にはないことからここでは主に電力などのエネルギー消費の観点から検討を行う。

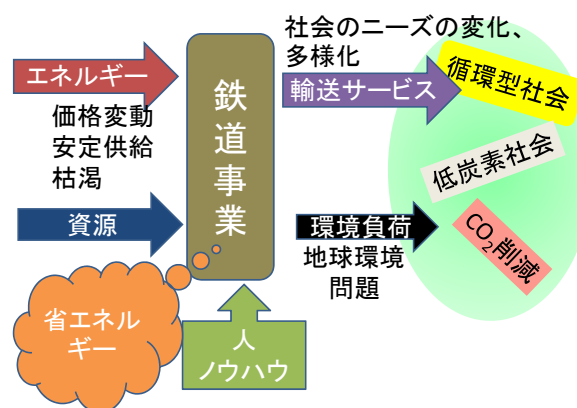
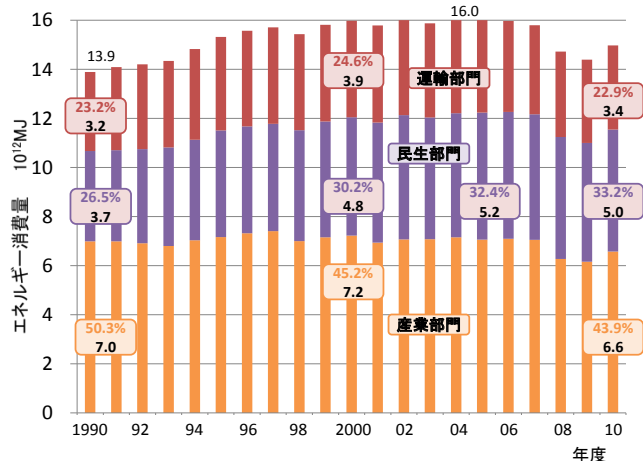


図1 鉄道事業とエネルギー

2. エネルギーの消費動向

2.1 我が国の状況¹⁾

我が国のエネルギー消費量は、経済成長に呼応して増加してきた。1965年度から1973年度までに2.5倍と急増し、その後は、2度の石油ショックなどもあり、1990年度で1965年度比約3倍と緩やかな増加に転じた。1990年度以降も、図2に示すように2000年度までその傾向が継続したが、その後は横ばいになり、近年は若干減少している。部門別の動向を見ると産業部門では1970年代前半までエネルギー消費量が急激に増加したが、それ以降は経済規模の拡大に比してエネルギー消費が抑制されている。民生と運輸部門は1970年代以降も増加が続き、民生部門では1990年度基準でも2000年度には3割増となり全体に占める割合も1990年度の26.5%から2010年度の33.2%へと増加している。

図2 最終エネルギー消費の動向¹⁾

運輸部門では2000年度前後をピークにその後はやや減少傾向にあり全体に占める割合は1/4弱である。

2010年度の最終エネルギー消費の部門別比率は、図3に示すように産業部門が43.9%でそのほとんどは製造業である。民生部門は33.2%で内訳は[業務]:[家庭]が4:3である。運輸部門は全体の22.9%で、[旅客]:[貨物]は2:1である。

2.2 運輸部門の状況²⁾

旅客と貨物の2009年度の各輸送機関別のエネルギー消費の分担と輸送量の分担を図4に示す。旅客のエネルギー消費の約86%を乗用車が占め、バスや鉄道、航空機等がその残りを分け合っている。輸送量(人キロベース)は約60%が自動車であり、鉄道は約29%を占めている。鉄道はエネルギー消費に比して多くの輸送量を担っている。

貨物のエネルギー消費の約85%はトラックなどの自動車であり、次いで海運が約13%を占め、鉄道は僅か約0.4%である。輸送量(トンキロベース)では、自動車が約64%を占め、次いで海運が32%、鉄道が約4%となっている。

鉄道のエネルギー消費は、我が国全体に対して、旅客で0.56%、貨物で0.034%であり、合計すると約0.6%となる。

エネルギー消費量を輸送量で割った値が単位輸送量当たりのエネルギー消費量、すなわちエネルギー消費原単位であり、輸送のエネルギー効率の主要な指標である。客貨の2009年度の各輸送機関別の原単位を図5に示す。旅客では、原単位が小さい方から鉄道、バス、航空、乗用車そして旅客船の順番となっている。貨物では、同じく鉄道、内航海運、自動車そして航空の順

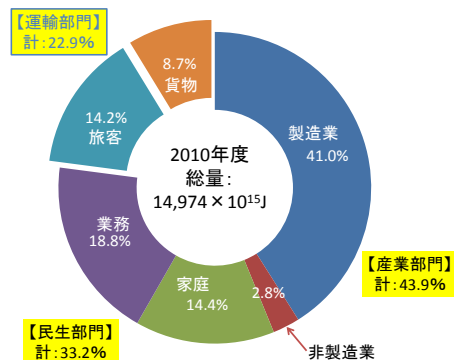
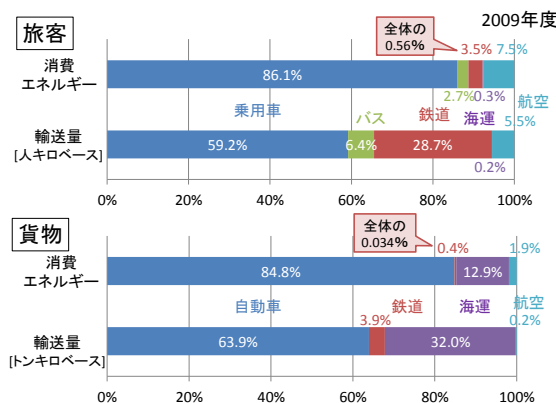
図3 最終エネルギー消費の部門別比率¹⁾

図4 輸送機関別のエネルギー消費と輸送量の分担

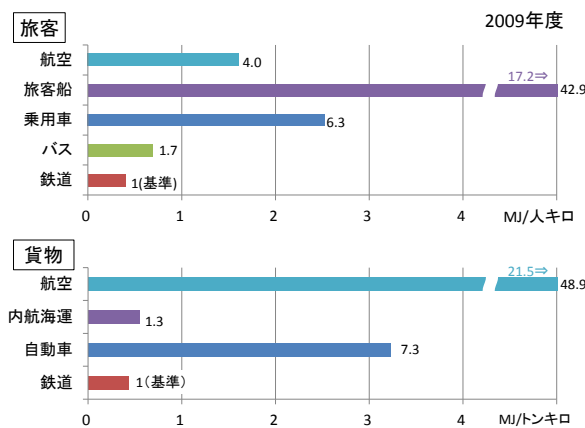


図5 輸送機関別エネルギー消費原単位

になっている。

旅客の消費エネルギー原単位の1994年度以降の推移を図6に示す。海運は鉄道の20倍以上であり、このグラフからは除外した。この15年間、鉄道はほとんど変化が無く、バスはわずかであるが2000年度頃にピークが見られる。航空は1割程度減少している。乗用車は2000年頃まで増加していたが、それ以降やや減少傾向がみられる。各輸送機関は、近年エネルギー効率(燃費)

が向上しているとされているが、全体として大きな改善につながっているとは言い難い状況にある。特に、乗用車の場合は省エネ性能に優れたハイブリッド車の導入が一部で進んでいるようであるが、乗車効率の低下や、乗用車では車両の大型化などの影響でこのような結果になっていると考えられる。

貨物のエネルギー消費原単位の1994年度以降の推移を図7に示す。なお、航空は鉄道の20倍以上となるためグラフからは除外した。自動車はこの期間ほぼ減少傾向にあるが、その原因としては、自家用から営業用へのシフトが進み、積載効率が改善したためと言われている。内航海運は、鉄道に次いで原単位が小さく、両者ともこの期間ほぼ一定の値で推移している。

2.3 鉄道の状況²⁾

旅客鉄道のエネルギー消費量、輸送量とエネルギー消費原単位のここ15年間の動向を図8に示す。エネルギー消費量にほとんど変化が見られないが、2005年度以降は軽油や電力の発熱量の改定値を使用しているため、やや変動がみられる。輸送量も大きな変動はない

が、2005年度頃がやや多く、2000年頃は谷となっている。結果としてエネルギー消費原単位は2005年頃にピークがみられるが、全体的には減少傾向にあり、近年は0.4MJ/人キロ程度となっている。

貨物鉄道のエネルギー消費量、輸送量とエネルギー消費原単位のここ15年間の動向を図9に示す。輸送量は、多少の変動はあるがほぼ一貫して減少する傾向にあり、エネルギー消費量も連動して減少している。その結果、エネルギー消費原単位は、多少の変動はみられるものの、15年で約1割減少している。もう少し詳細にみると2005年以降エネルギー消費原単位がやや減少していたが、リーマンショックの2008年以降は輸送量の減少が目立ち、その影響でエネルギー消費原単位が上昇して、0.45MJ/トンキロ程度になっている。

3. エネルギー消費の評価

鉄道事業者の地球環境問題への近年の取り組みは環境報告書などに公表されており、それらによると省エネ車の導入が進められている。その結果として、エネ

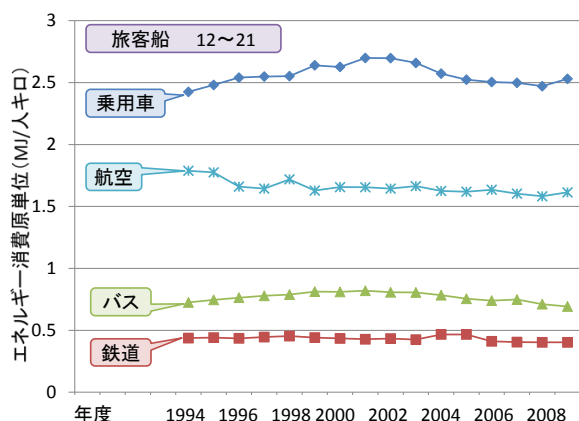


図6 旅客の輸送機関別エネルギー消費原単位の推移

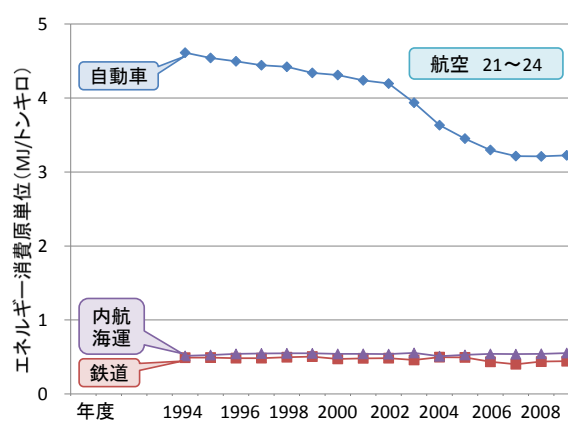


図7 貨物の輸送機関別エネルギー消費原単位の推移

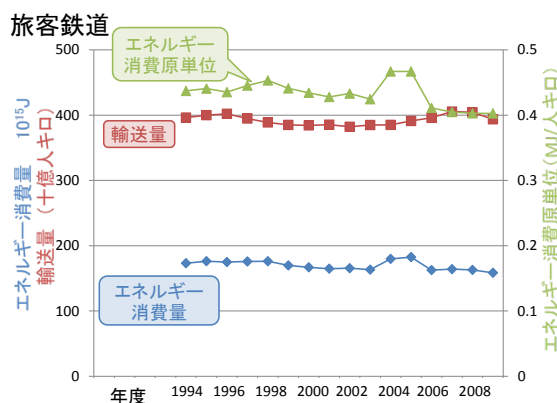


図8 旅客鉄道の輸送量、エネルギー消費量と原単位

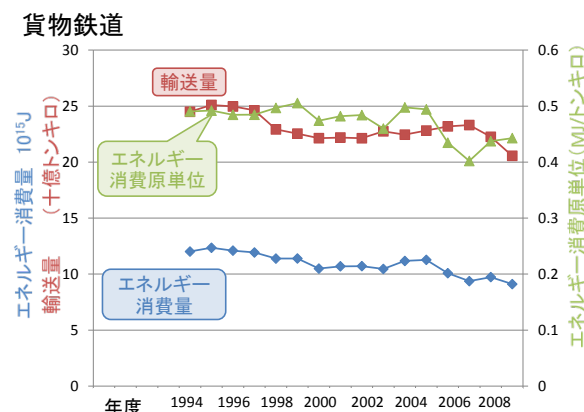


図9 貨物鉄道の輸送量、エネルギー消費量と原単位

ルギー消費原単位の減少が期待されるが、前節に示したように個別の省エネ車の効率向上と同等の実績にはなっていない。その原因を調べるため、鉄道事業者の環境報告書などに公表されているデータに基づきその状況について検討を試みた³⁾。

検討の対象となるデータとしては、エネルギー関連では、電車を運行している事業者の場合、電力量があり、輸送に関しては、旅客の輸送量（人キロ）、車両の走行距離（車キロ）がある。電力量は、車両で消費される運転用と駅や信号関係などで使用される付帯用に分けられる。さらに本社などの管理部門や場合によっては駅ビルなどでの消費電力も別途公表されている事例もある。

運転用と付帯用エネルギーの構成比の代表的な事例を図10に示す。ほとんどすべての駅が地下にあり、昇降装置や空調などの設備が多い地下鉄は付帯用の比率が高く4割を超えている。大都市圏の通勤線区主体の場合は橋上駅や地下駅が多いため、設備が比較的多く、付帯用が2割強となっている。都市近郊区間は、地上駅もあり、また駅の密度が低く相対的に付帯用の比率が低くなっている。なお、運転用には、車両の空調なども含まれている。

図11は、鉄道事業者Aのここ20年間の運転用と付帯用の年間消費電力量の推移で、1990年度の運転用電力量を基準（＝1）として示している。この事業者の場合、運転用に対する付帯用の比率は2割から3割程度で年々増加し、2009年度の付帯用は1990年度の約2倍になっている。運転用電力量は2000年度を境にやや増加し、2009年度の運転用は1990年度の1割増となっている。

図12は輸送量（人キロ）、車両走行距離（車キロ）とそれらから導かれる一両当たりの乗客数の推移を1990年度基準で表示したものである。1990年代に輸送量はやや減少したが、2000年以降は増加し、2009年度には1990年度比1.15となっている。車両走行距離は2000年頃まではほぼ一定であるが、それ以降は増加傾向にあり、2009年度には1990年度比1.30に達している。その結果として、一両当たりの乗客数は、一貫して減少傾向にあり2009年度には1990年度比で約1割の減少となっている。このことは、全体として混雑率が減少しサービス向上が行われたことを意味している。

図13にエネルギー消費原単位（輸送原単位、動力原単位及び総括原単位）の1990年度基準の推移を示す。但し、総括原単位は1990年度の動力原単位基準である。ここで、輸送原単位は電力量を輸送量（人キロ）で割っ

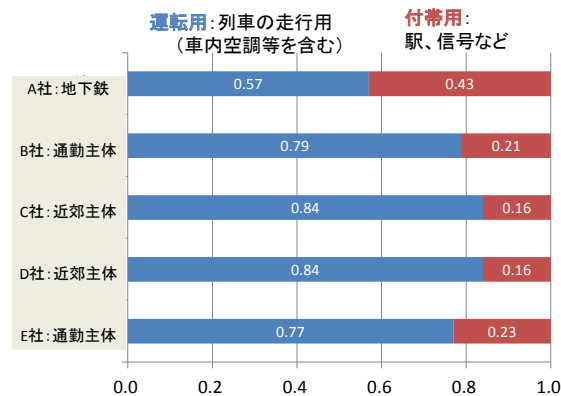


図10 運転用及び付帯用エネルギーの構成比（例）

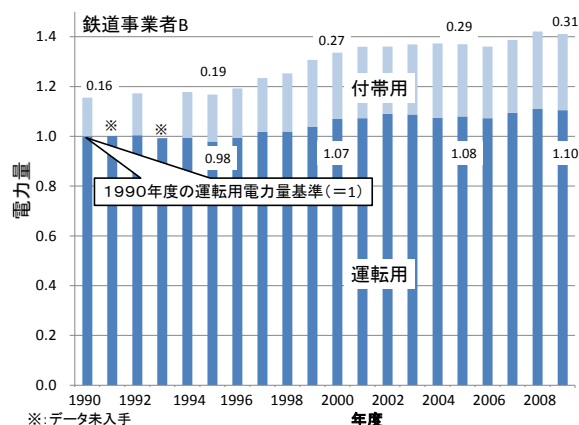


図11 運転用及び付帯用電力量の推移

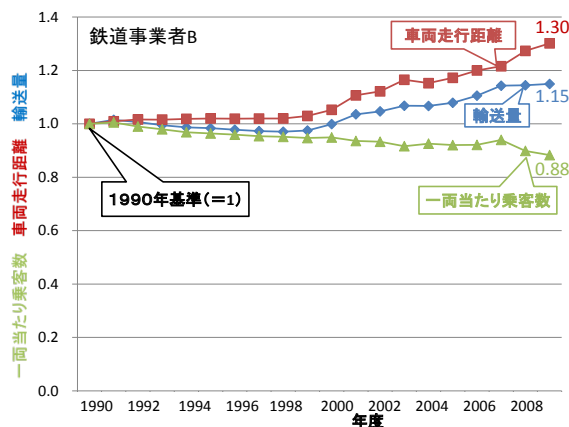


図12 一両当たり乗客数の推移

た値、動力原単位は電力量（運転用）を車両走行距離（車キロ）で割った値、総括原単位は電力量（運転用＋付帯用）を車両走行距離で割った値である。輸送原単位は2000年度頃がやや大きい1前後で推移しており、ほとんど変化はない。動力源単位は2000年度頃まではほとんど変化がなく、その後は減少傾向にあり2009年度には15%程度減少している。言い換えると車両キロ当たりでエネルギー消費量は減少しているが、人キロ当たりではほとんど変化していない。総括原単位は、

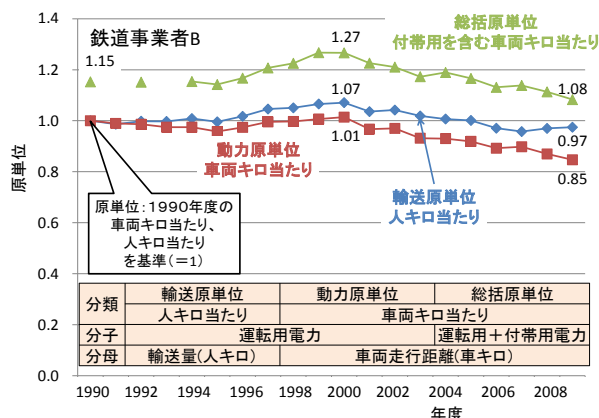


図13 原単位の推移（人キロ、車キロ当たり）

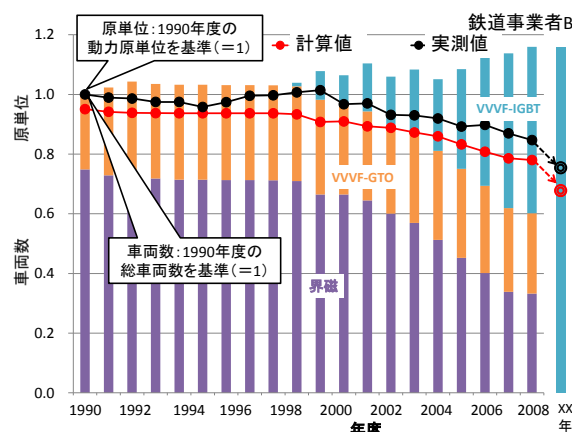


図14 省エネ車の構成比と動力原単位の推移

動力原単位よりも2割程度大きく、その差は拡大傾向にある。

それでは、動力原単位はどうして減少したのだろうか。図14は、省エネ車の導入と動力原単位の推移を示したものである。棒グラフは、1990年基準の車両数であり、車両の内訳として界磁チョップ制御車（界磁）とVVVF-GTO制御車（VVVF-GTO）と1999年以降に導入が進んだVVVF-IGBT制御車（VVVF-IGBT）に分類している。それぞれの代表車種が同一区間を走行した際の車両キロ当たりの電力消費量は、界磁を基準（=1）とした場合、VVVF-GTOが0.76、VVVF-IGBTが0.64であるとの実測例が公表されている。積算原単位はこれらのデータを使い、車両走行距離が車種別の車両数に比例すると仮定して計算した車両キロ当たりの消費電力量（計算値）である。かなり粗い推定ではあるが、動力原単位（実測値）に比べてやや小さい値となつてはいるものの変化の傾向はほぼ表現できている。

この鉄道事業者の場合は、VVVF制御車の導入により1990年以降、動力原単位が2割程度低減したが、図11に示したように一両当たりの平均乗客数も1割強減少したため、人キロ当たりのエネルギー消費原単位は僅かな減少となっている。今後、VVVF制御車への置き換えが完了すると動力原単位はさらに1割強減少することが推定され、輸送量に変化しないとすると最終的に1990年度比25%の低減が期待される。

4. 動力システムの違う車両の比較

省エネ技術を開発していく際には、その効果を適切に評価することが求められる。新たなエネルギー源やハイブリッドなどの従来とは異なる方式の車両につい

ても地上の設備を含めた評価が求められる。

ここでは在来線の気動車が走行している区間を電化して電車を導入する場合について見てみよう。車齢30年以上の従来型気動車、近年投入された新型気動車と標準的な電車を投入した場合のライフサイクルでのCO₂排出量についての検討を行った⁴⁾。

電車を投入するためには、電化が必要であり、電車線と変電所の建設と運用の評価も行った。車両の運行条件は現状のままとし、60年を評価期間とした。車両の運行に必要なエネルギー量は鉄道総研の評価シミュレーションを使用した⁵⁾。

図15は電車と気動車のエネルギー消費量を電車の運行エネルギーを基準として示したものである。従来型気動車に比べて、新型気動車は約半分で、電車はさらにその6割程度となっている。なお、図中の燃料電池車とハイブリッド型電車は別の条件でそれぞれ従来型気動車及び標準型電車と比較評価した結果を当てはめて表示したものである。いずれも比較対象車両に比べ走行エネルギー量は減少する結果となっている。

ライフサイクルの評価では、図16にCO₂排出量で評価した結果を示す。地上設備の建設を含めた場合はCO₂排出量をエネルギーに換算するためのいくつかの仮定が必要になるが、60年をライフサイクルとして評価したこの結果では、運行エネルギーによるCO₂排出が大きな比率を占めており、エネルギーに換算した場合でもほぼ同様の傾向になると考えられる。

以上のように、新たなエネルギー源やシステムを採用した場合には、車両だけではなく付随する地上設備についても耐久性を含めて評価することが必要となる。

一方、貨物鉄道においても省エネ機関車の導入が進んでいる。省エネ電気機関車の2010年度の導入実績は48.3%で、電力消費原単位が1995年度比で4.1%改善

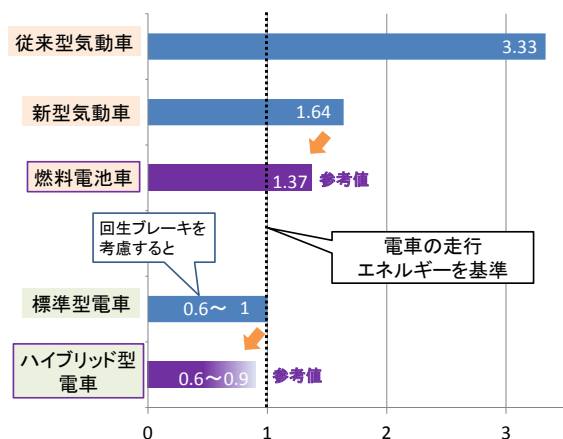


図15 動力システムの違う車両の走行エネルギー消費量

し、また、貨物駅構内の入れ替え作業用として配備が始まったハイブリッド機関車HD300形式は燃料消費量が従来機に比較して36%低減するとの実績が報告されている⁶⁾。

5. 課題の整理と今後の方向

鉄道のエネルギー消費の20年間の動向を振り返り、省エネルギー技術の普及とその効果の動向について課題を整理し、将来に向けての方向性をまとめた。

- ① 運転用エネルギーが全体としては、7～8割程度を占め、今後も省エネへの取り組みの最も主要な分野である。省エネ車両や省エネ機器の導入が行われたが、混雑の緩和などのサービス向上が行われ全体としてのエネルギー消費量の削減や単位輸送量当たりのエネルギーの削減効果は半分程度である。また、車両などの置き換え寿命は20年から30年程度の場合が多く、最新の省エネ技術への更新にはその程度の時間を要している。現時点での最新の省エネ車両への置き換えが今後進むことにより省エネが進むと考えられる。
- ② 一方で、付帯用エネルギーは駅のサービス機器の増加を反映して、近年一貫して増加傾向にあり、今後は省エネ対策の重要性が増加する分野である。
- ③ 現行のシステムでの更なる省エネとしては、機器の高効率化、送電システムを含めた効率化、運転方法の効率化などがある。
- ④ 鉄道分野のエネルギー消費量は、我が国全体の0.6%程度であるが、約25%を占める輸送機関

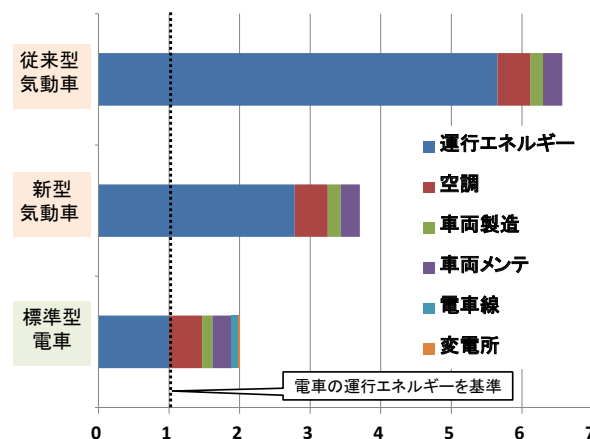


図16 気動車と電車のライフサイクルCO₂（評価期間：60年、電車運行エネルギー基準）

全体の中で鉄道に適した役割を果たしてモデルシフトを推進することで、より大きな貢献が可能である。

- ⑤ 現在の鉄道は主に電力を直接のエネルギー源としているが、今後は一次エネルギーの質や供給、また新たなエネルギーサイクルへの転換に向けた動向に関しても十分に配慮していくことが重要になると考える。

以上より、2030年頃までは、主に現在の省エネ技術及びその延長上の改良技術の普及により車両キロ当たりのエネルギー消費量の低減が進んでいくと考えられる。その後は、都市の変革やライフスタイルの変化に合わせて、徐々に新たなエネルギーやシステムへの転換が進むことによって更なる省エネルギーの実現が期待される。なお、各技術分野の開発動向については、この後の各講演をご聴講いただきたい。

【参考文献】

- 1) 資源エネルギー庁：平成22年度におけるエネルギー需給実績（確報），平成24年4月13日
- 2) 国土交通省：交通関係統計資料集（交通関係エネルギー要覧）
- 3) 鉄道事業者の環境報告書、CSR報告書
- 4) 相原直樹，森本文子，辻村太郎：ライフサイクルCO₂排出量の在来線車種別評価，鉄道総研報告，Vol.25，No.10，pp.29-34，2011年
- 5) 中村英夫，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年
- 6) JR貨物：環境・社会報告書2011