

アルミニウムの活用による機械工業の
省エネに関する調査研究報告書

平成11年3月

社団法人 日本アルミニウム連盟

4. 鉄道車両用材料のアルミニウム化による省エネルギー

4. 1 鉄道車両へのアルミニウム適用の動向

4.1.1 鉄道車両のアルミニウム化の現状

日本のアルミニウム車両の進歩は在来車両で誕生し、地下鉄車両で育ち、より荷重の厳しい新幹線車両まで進化した^{1) 2)}。

図4.1-1にアルミニウム車両の生産累計の年次変化を示す¹⁾。現在、全国で約43千両の車両があり、ステンレス鋼車両は約13千両、スチール車両は約20千両である。アルミニウム車両は1999年中には約10千両に達すると予想されている。アルミニウム車両は1980年以降急激に増加している。最近の新車両製造台数は約1,500両で、アルミニウム車両約550両、ステンレス鋼車両約700両、スチール車両約200両である。アルミニウム車は軽量化による環境負荷・地盤振動、高速化には有効に働くが、車両製造時のコスト、製造のしやすさ、リサイクル性などに優れるステンレス車を参考に問題点を解決していく必要がある。

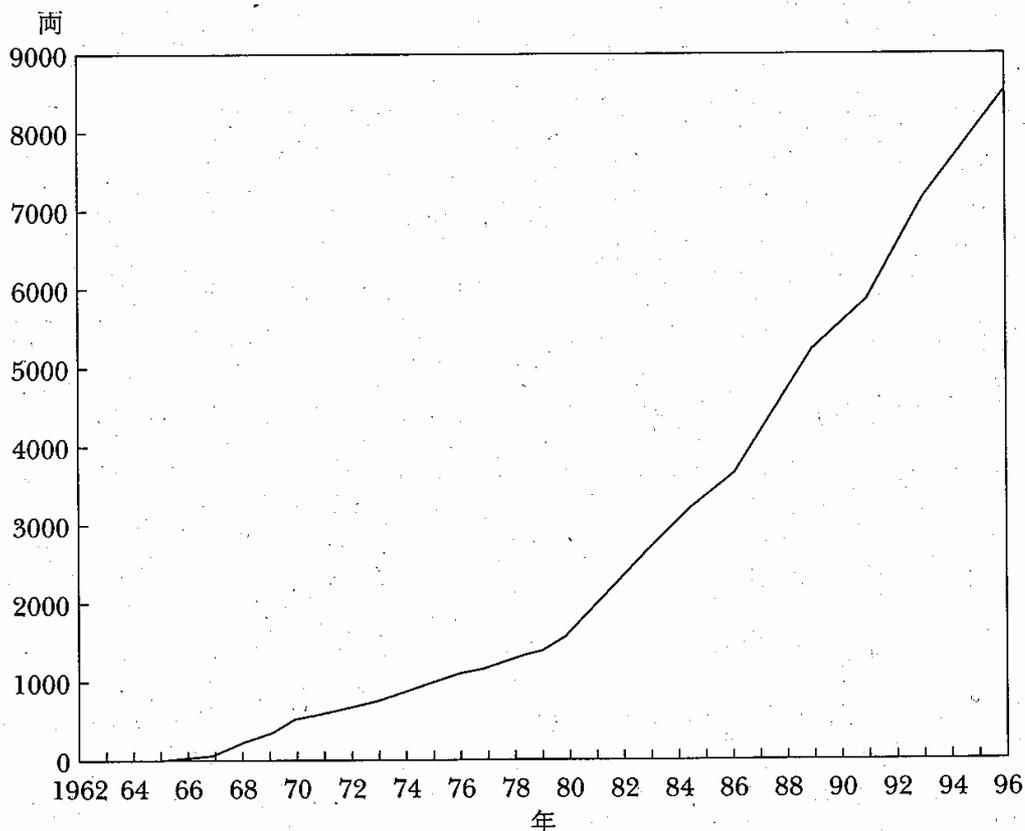


図4.1-1 アルミニウム車両の生産累計の年次変化

4.1.2 新幹線電車（700系、500系）の構体構造とアルミニウム合金が使用されている部品

図4.1-2は1996年1月に完成した500系新幹線電車の車体構造を示す¹⁾。30mm厚のろう付けアルミニウムハニカムパネルを側構体と床構体に使用し、幕板と屋根構体はA6N01S合金薄肉形材によるシングルスキン構造としている。高速化による動力推進装置の質量増加のためと全質量規制のためシングルスキン構造としているが、快適性、構造の単純化を考えるとダブルスキン構造が理想である。

図4.1-3に1997年9月に完成した700系新幹線電車の車体構造を示す¹⁾。A6N01合金による中空材を側構体と屋根構体に使用し、床構造は薄肉形材によるシングルスキン構造としている。快適性からは床構造も中空形材とすることが望ましいが、厳しい質量規制のためにシングルスキン構造としている。

700系新幹線電車には多くのアルミニウム部品が使われているが、表4.1-1に100系、300系と比較して、700系のアルミニウム部品採用状況をまとめて示す¹⁾。すでに、300系において鋼製の部品がアルミニウム製に変わり、耐食性が向上し、車体のメンテナンス頻度を大幅に削減することが可能になったばかりでなく、軽量化、リサイクル効率の向上にも貢献した。

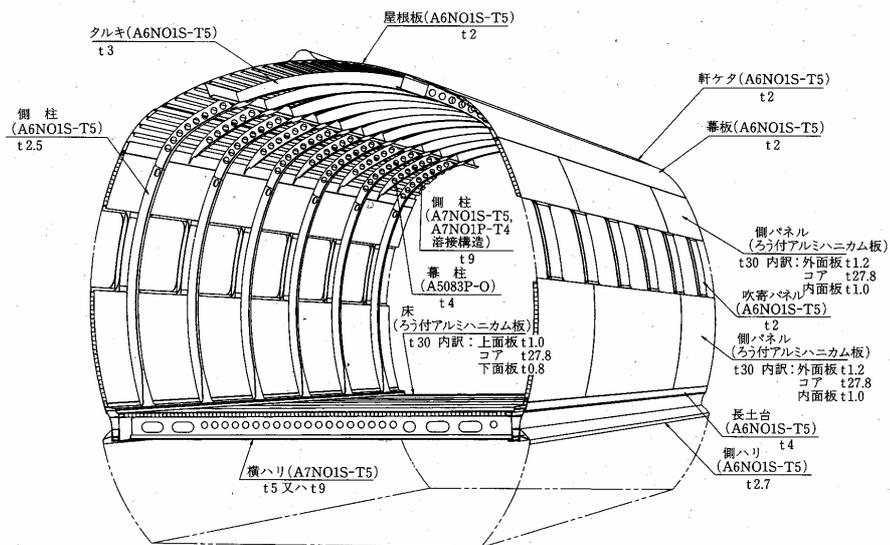


図4.1-2 500系新幹線電車の車体構造（一般部）

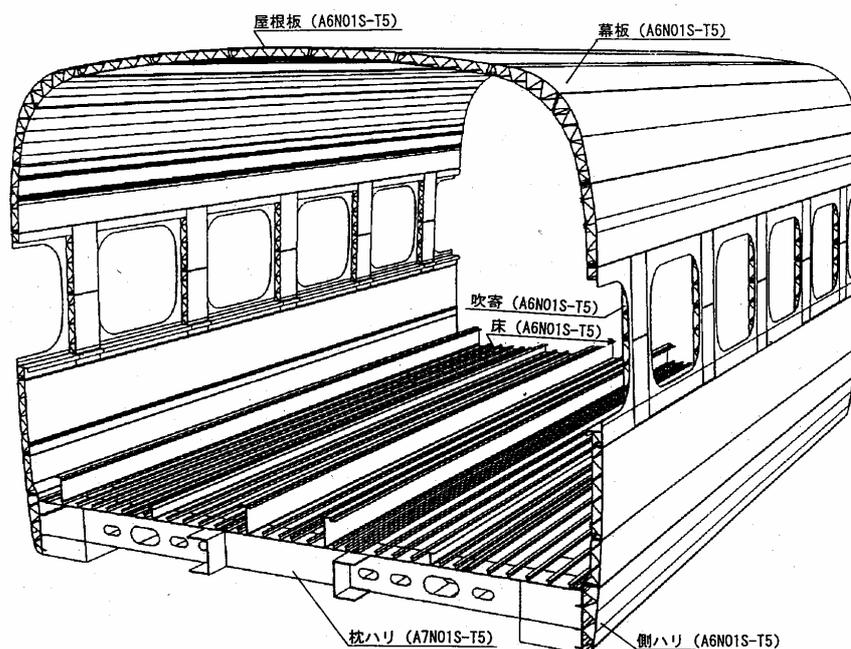


図4.1-3 700系新幹線電車の構体構造（一般部、屋根、側：ダブルスキン）

表4.1-1 100系、300系、700系のアルミニウム合金採用範囲の拡大状況

部 位	100系	300系	700系	記 事
構体	鋼製	アルミニウム製	アルミニウム製	
床下フサギ板	ステンレス鋼製	ステンレス鋼製	アルミニウム製	700系は一部ステンレス鋼混在
客室内張板	FRP、アルミ	アルミニウム製	アルミニウム製	
空気配管	鋼製	鋼製	アルミニウム製	700系は一部鋼管混在
出入台握り棒	ステンレス鋼製	鋼製	アルミニウム製	
貫通扉	ステンレス鋼製	ステンレス鋼製	アルミニウム製	
屋根上特高圧部品カバー	-	鋼製	アルミニウム製	700系は一部鋼製
グリーン車腰掛主枠材	鋼製	鋼製	アルミニウム製	
普通車腰掛主枠材	鋼製	アルミニウム製	アルミニウム製	
台車スカート	鋼製	アルミニウム製	アルミニウム製	
空調機主枠板材	ステンレス鋼製	ステンレス鋼製	アルミニウム製	700系は一部ステンレス鋼混在
SBB箱主枠	鋼製	アルミニウム製	アルミニウム製	300、700系とも一部鋼製
主回路制御装置主枠	鋼製	アルミニウム製	アルミニウム製	
ブレーキシリンダー	鋳鉄製	アルミニウム製	アルミニウム製	増圧部
主変圧器巻線	銅製	銅製	アルミニウム製	700系は一部銅製
台車歯車箱、軸箱	鋼製	アルミニウム製	アルミニウム製	

4.1.3 営団地下鉄05系に使用されているアルミニウム部品

営団地下鉄では1971年に千代田線にアルミニウム車両6000系を130両を導入し、1997年には1,250両になっている。図4.1-4は1983年以降の営団地下鉄のアルミ車率と平均使用電力量の変化を示す¹⁾。アルミ車率の増加とともに使用電力量が減少している。

表4.1-2に営団地下鉄05系に使用されている部品のなかで、アルミニウム使用量が多い部品を示す³⁾。1編成当たり車体関係の部品で68トン（アルミニウム化率=59%）、電機部品・制御機器関係の部品で約7トン（アルミニウム化率=11%）、合計約75トン（アルミニウム化率=42%）のアルミニウムが使用されている。表4.1-3は他の金属材料の使用量、使用比率と比較したものである³⁾。

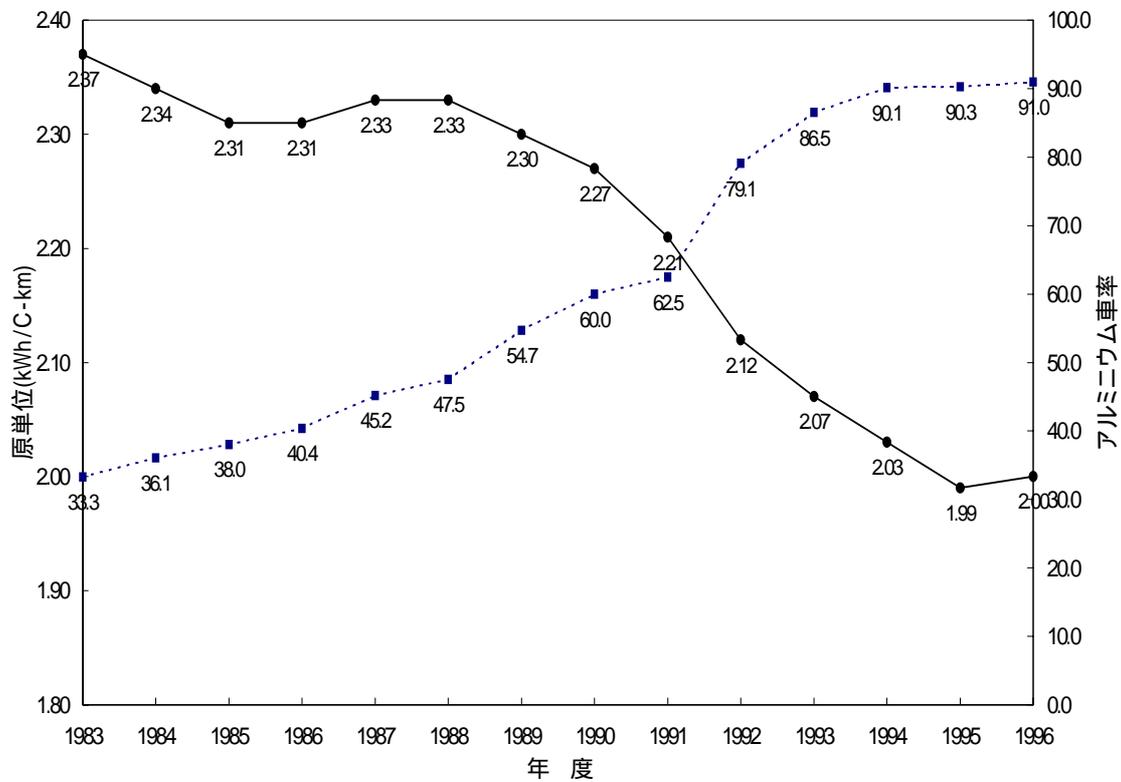


図4.1-4 営団地下鉄アルミニウム車率と使用電力量の推移

表4.1-2 営団地下鉄05系部品のアルミニウム使用量及びアルミニウム化率

部 品 名	アルミニウム使用量(kg)	アルミニウム化率(%)
1. 車体関係		
(1) 構体	45,960	94
(2) 内張り・天井	6,812	65
(3) 窓	1,514	28
(4) 戸・点検蓋	2,750	36
(5) 設備品	996	12
(6) ダクト	4,160	77
(7) 合計	68,000	59
2. 電機部品及び制御機器		
(1) 制御装置インバータ箱	868	11
(2) 制御装置フィルタリアクトル	756	50
(3) ブレーキ装置作用装置	1,740	58
(4) ブレーキ装置ユニットブレーキ	1,300	42
(5) 冷房装置屋上集中ユニット	790	11
(6) 合計	7,445	11
3. 総合計	75,445	42

表4.1-3 営団地下鉄05系部品の金属材料使用量及び使用率

	アルミニウム使用量・率	鋼使用量・率	ステンレス鋼使用量・率	銅使用量・率
車体関係	68,000kg(59%)	19,264(17)	5,278(5)	4,110(4)
電気部品及び制御機器	7,445kg(11%)	46,283(70)	4,004(6)	6,115(9)
合計	75,445kg(42%)	65,547(36)	9,312(5)	10,225(6)
総合計	180,778kg(100%) 車体114,652kg(63%) 電機部品及び制御機器66,126kg(37%)			

4. 2 鉄道車両用アルミニウムの技術動向と技術課題

4.2.1 鉄道車両構体の技術要素と相関性

図4.2-1に鉄道車両構体の技術要素と相関性を示す¹⁾。構体構造自体のほかにも基本要素として、質量、強度、剛性の3要素がある。これらは環境負荷・地盤振動、垂直荷重・圧力荷重、車両限界・形状保持性の環境3要素から影響を受ける。さらに、高性能な車両を実現するのに必要な高速性、快適性、安全性の車両3要素、及び全要素のバランスより達成される効率性・経済性の11要素を考慮しなければならない。

軽量化は環境負荷・地盤振動、高速性には有効に働くが、快適性には不利に働く。効率性・経済性の高い車両を実現するにはこの矛盾を解決しなければならない。従来、高速化のために軽量化が重視され、快適性が犠牲にされることもあったが、快適性を重視するために構体の質量増を許容し、構体以外の装置で軽量化を図ろうとする動きもある。

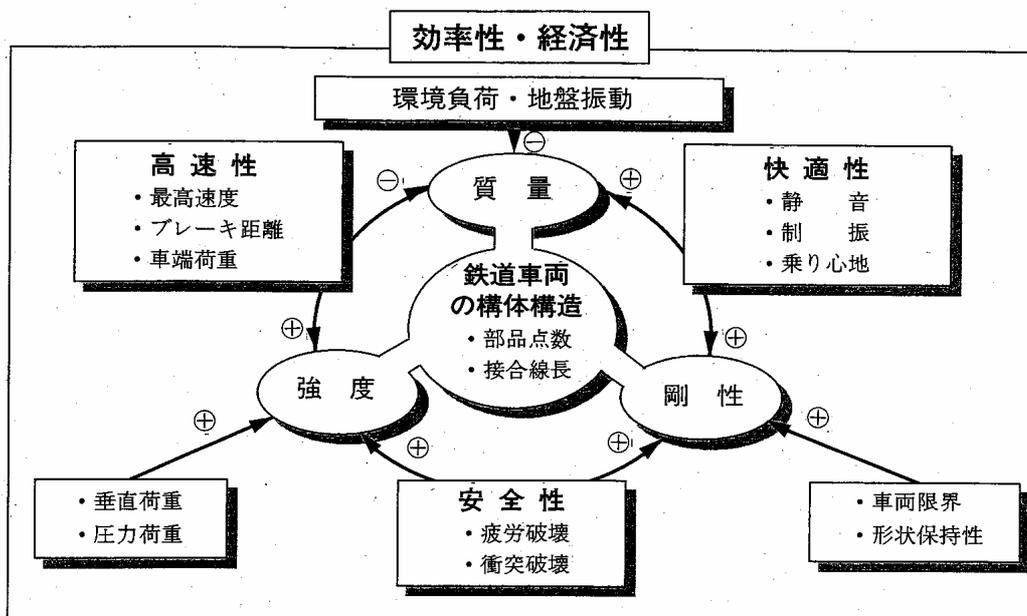


図4.2-1 鉄道車両構体の技術相関性

4.2.2 鉄道車両用構体材料に要求される機能

鉄道車両用構体材料に要求される機能をアルミニウム合金に当てはめてまとめたものを図4.2-2に示す¹⁾。従来、基本機能と加工性に関する機能のみでその有用性が考えられてきた。今後は、これら機能に付加して、快適性、リサイクル性などの機能でその有用性を判定されることになる。一例として、A7N01合金は強度的に優位であるが、リサイクル性からはA6N01合金が優位であり、A6N01合金の有用性が向上している⁴⁾。強度的に劣るA6N01合金をいかに使いこなすかを、中空型材を使用した構体構造などによる工夫で克服する必要がある。

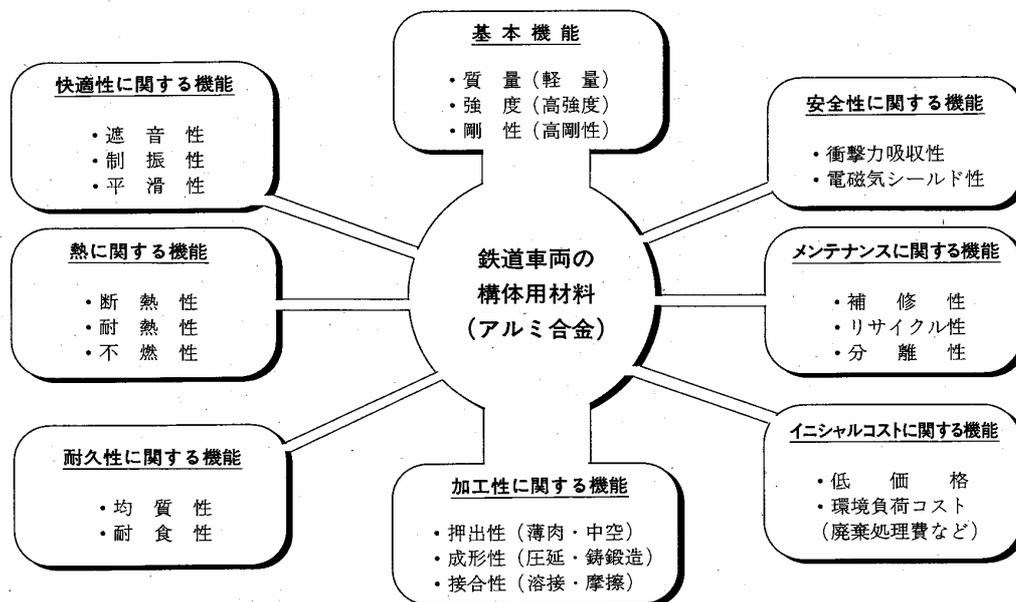


図4.2-2 鉄道車両構体用材料 (アルミニウム合金) に望まれる機能

4.2.3 アルミニウム合金製構体構造の開発経緯

図4.2-3にアルミニウム合金製構体構造の開発経緯を示す¹⁾。合金開発は溶接構造用としてA7N01合金が開発され、リベット構造が解消された。次いで、押出し性を向上させたA7003合金が開発され、さらに、押出し性、溶接性が改善されたA6N01合金が開発された。

製造技術では、大型プレスを採用による薄肉形材の製造技術、ダブルスキン構造の採用に伴う中空形材の製造技術の開発がある。

4.2.4 鉄道車両構体の今後の動向

最近の新幹線電車の動向からもわかるように、構体構造のトレンドとしては、シングルスキンからの全断面ダブルスキン構造へ変革すると考えられる。ダブルスキン構造は重量の増加をもたらすので、重量軽減のため中空形材の薄肉化が必要となる。また、ダブルスキン構造は接合線が表裏2重となり、溶接線長さは倍増するため、表裏2重の接合線を1パスで接合し、コストを低減する技術が必要となる。

技術分野		1945	1955	1965	1975	1985	1995	2005	2015	(年)	
アルミニウム合金技術	合金開発	ジュラルミン(2024・7075・7050)									
		5083									
		7N01									
		7003									
		6N01									
	製造技術	板 材									
中型形材											
9,500ton プレス機稼働											
薄肉形材											
車両構体製造技術	接合技術	リベット									
		アーク溶接(MIG・TIG)									
		抵抗スポット溶接									
		アルミブレージング									
	構造分類	摩擦接合									
		シングルスキン ハイブリッド(シングル+ダブル) ダブルスキン									
	構造技術	航空機構造(ジュラルミン+リベット)									
		鋼製車構造アルミ置換									
		薄肉形材(シングル)									
		中空形材(ホロー材=ダブル)									
ハニカムパネル											

図4.2-3 アルミニウム合金製車両構体構造の開発経緯

アルミニウム合金に関しては、従来A7N01合金が主流であったが、A7N01合金は他の用途が少ないことから、リサイクル性に劣ることもあり、現在ではA6N01合金が主流となっている。今後は、A6N01合金への単一合金化の開発が期待される。特に、新幹線の車両では強度面からA7N01合金が使用されているので、強度、溶接性、耐食性を兼ね備えたA6N01系合金の開発が必要である。

4. 3 鉄道車両材料のLCA的計算

近年、環境問題が地球規模で重要な問題の1つになってきており、地球温暖化の主原因であるCO₂の排出削減などの問題が大きく取り上げられている。環境負荷を定量的に評価する手法としてLCA(Life Cycle Assessment)が注目されており、ISO14000sにおいて国際標準化が進められている。このLCAの手法自体はまだ確立されていないのが現状であるが、家電製品や自動車などではLCAのいくつかの実施事例が報告されている⁵⁾。一方、鉄道車両においてもLCAの実施事例が見られるようになってきており^{6),7)}、それらの報告には、ライフサイクルにおいて、走行時のエネルギー消費量が最も高いことが示されている。

本報告では、営団地下鉄の9000系二次車について、車両構体材料にリサイクル材を使用した場合と材料を変更した場合のエネルギー消費量やCO₂排出量に関するLCAを実施した。

4.3.1 LCA 調査方法

1) 対象範囲

鉄道システムは、鉄道車両、軌道や構造物等様々な要素から成り立っている。最終的にはそれらを包括したLCAの実施が必要であると考えられるが、今回は、鉄道車両のみを取り上げることとする。図4.3-1に鉄道車両のライフサイクルフローを示す。ライフサイクルステージとして製造、運用・メンテナンスおよび最終廃棄の3段階を考える。各段階にはエネルギーや原材料のインプットがあり、排気、廃水および廃棄物等のアウトプットがある。今回は、エネルギー消費量とCO₂排出量のみを調査する。なお、各ステージ間の輸送は検討対象の範囲内に含めないこととする。

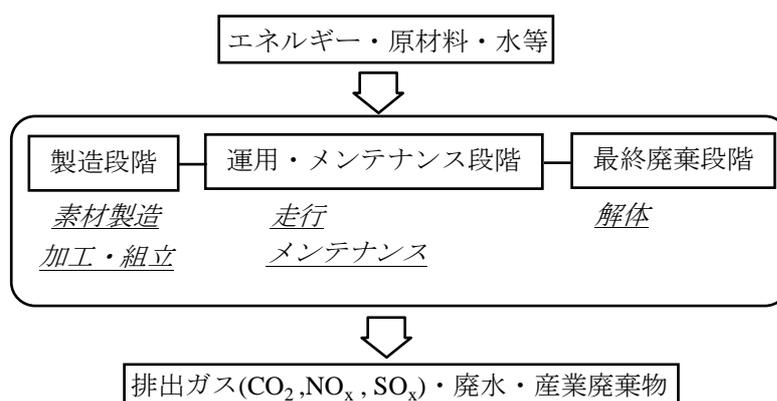


図 4.3-1 鉄道車両のライフサイクル

対象車両は、営団地下鉄の9000系二次車（以下9000系）である。9000系の仕様は、表4.3-1の通りである。9000系をベースに車両構体材料が表4.3-2に示す4通りの場合について検討した。①は新地金アルミニウムを使用した場合、②は車両に使用されているすべてのアルミニウムを再生地金とした場合、③はアルミニウム構体をステンレス鋼に変更し、

バージン材料を使用した場合、④はアルミニウム構体を鋼製に変更し、バージン材料を使用した場合である。再生地金アルミニウムの使用やアルミニウムの車両構体を鋼、ステンレス鋼に変更することによる車両の重量増加が、走行および生涯におけるエネルギー消費量やCO₂排出量に及ぼす影響を調べた。なお、各材料における車両構体の重量は、文献⁸⁾を参照した。

表 4.3-1 9000 系二次車の仕様

項目	内容	備考
車種	アルミニウム合金製車両 VVVF インバータ制御方式	
電気方式	力行 DC1500V 回生 DC1650V	
列車編成	6 両編成	
車両重量	CT 車:25.7t M1 車:33.5t、M2 車:31.5t	
定員	先頭車:140 人中間車:150 人	55kg/人
車両寸法	L W H 20,000 × 2,830 × 4,145mm	
車輪径	860mm	
制御装置	VVVF インバータ	
主電動機	190kW(1,100V、130A) 誘導電動機	

表 4.3-2 LCA 比較

	車両構体材質	構体重量(t)	1 車両重量(t)	備考
	アルミニウム合金	4.7t	30.13	新地金使用
	アルミニウム合金	4.7t	30.13	再生地金使用
	ステンレス鋼	6.8t	32.23	バージン材料使用
	鋼	9.7t	35.13	バージン材料使用

2) 計算方法

ライフサイクル全体でのエネルギー消費量 (LCE) と CO₂ 排出量 (LCCO₂) は、3 つの段階でのエネルギー消費量と CO₂ 排出量のそれぞれの和で示す①式、②式で定義される。

$$LCE=E_1+E_2+E_3\cdots\textcircled{1} \quad LCCO_2=C_1+C_2+C_3\cdots\textcircled{2}$$

- (1) 製造段階におけるエネルギー消費量 : E₁、CO₂ 排出量 : C₁
- (2) 運用・メンテナンス段階におけるエネルギー消費量 : E₂、CO₂ 排出量 : C₂
- (3) 最終廃棄段階におけるエネルギー消費量 : E₃、CO₂ 排出量 : C₃

これらのエネルギー消費量と CO₂ 排出量は、車両 1 両当たりそれぞれ GJ/両および t/両で表示した。

表 4.3-3 にエネルギー原単位と CO₂ 原単位を示す。日本ではまだ統一された原単位が整備

されていないのが実状であるが、今回は、エネルギー原単位は基本的に文献⁶⁾のデータを使用し、CO₂原単位は表4.3-3に記載した出典の原単位を使用した。一部単位換算を行っている。アルミニウムの原単位は、新地金、再生地金ともに日本アルミニウム連盟の押出材のデータである。再生地金のエネルギー原単位は新地金の約25%、CO₂排出原単位は約15%であり、アルミニウムはリサイクルされると非常に原単位が小さくなることがわかる。

表4.3-3 エネルギー原単位とCO₂原単位

	エネルギー原単位	CO ₂ 排出原単位
鋼 ⁹⁾	26.17 GJ/t	1.99 t/t
ステンレス鋼	24.83 GJ/t ⁶⁾	3.273 t/t ¹¹⁾
新地金アルミニウム ^{注1)}	179.90 GJ/t	10.234 t/t
再生地金アルミニウム ^{注1)}	43.77 GJ/t	1.605 t/t
銅線	88.22 GJ/t ⁶⁾	1.612 t/t ¹⁰⁾
重油	39.06 GJ/k1 ⁶⁾	0.120 t/k1 ¹¹⁾
軽油	38.64 GJ/k1 ⁶⁾	0.103 t/k1 ¹¹⁾
燃料油 ^{注2)}	38.22 GJ/k1 ⁶⁾	0.109 t/k1 ¹¹⁾
灯油	37.38 GJ/k1 ⁶⁾	0.099 t/k1 ¹¹⁾
LPG	54.60 GJ/t ⁶⁾	0.768 t/t ¹²⁾
酸素	0.00798 GJ/m ³ ⁶⁾	0.452 × 10 ⁻³ t/m ³ ¹¹⁾
電力	9,450 kJ/kWh ⁶⁾	0.392 × 10 ⁻³ t/kWh ¹⁰⁾

注1) アルミニウムは日本アルミニウム連盟の押出材のデータである

注2) 燃料油:重油と灯油の平均

(1) 製造段階

製造段階でのエネルギー消費量 E_1 と CO₂ 排出量 C_1 は、素材製造（エネルギー消費量： E_{1M} 、CO₂ 排出量： C_{1M} ）と加工・組立（エネルギー消費量： E_{1P} 、CO₂ 排出量： C_{1P} ）のエネルギー消費量および CO₂ 排出量の和であり、それぞれ③式、④式で定義される。

$$E_1 = E_{1M} + E_{1P} \cdots \textcircled{3} \quad C_1 = C_{1M} + C_{1P} \cdots \textcircled{4}$$

①素材製造

素材製造のエネルギー消費量 E_{1M} と CO₂ 排出量 C_{1M} は、材質 i 毎（鋼、アルミニウム等）の車両構成重量 W_i (t/両) に材質 i 毎のエネルギー原単位 a_i (GJ/t) と CO₂ 原排出単位 b_i (t/t) をそれぞれ乗じて足し合わせる⑤式、⑥式で算出した。

$$E_{1M} = \sum (a_i \cdot W_i) \cdots \textcircled{5} \quad C_{1M} = \sum (b_i \cdot W_i) \cdots \textcircled{6}$$

②加工・組立

加工・組立のエネルギー消費量 E_{1P} と CO₂ 排出量 C_{1P} は、文献⁶⁾のデータをもとに、燃料の種類 j （油、ガス、電力等）別の使用量 W_{1j} (k1/両等) に燃料の種類 j 別のエネルギー原単位 a_j (GJ/k1 等) と CO₂ 原単位 b_j (t/k1 等) をそれぞれ乗じて足し合わせる⑦式、⑧式で算出した。

$$E_{1P} = \sum (a_j \cdot W_{1j}) \dots \textcircled{7} \quad C_{1P} = \sum (b_j \cdot W_{1j}) \dots \textcircled{8}$$

(2) 運用・メンテナンス段階

運用・メンテナンス段階でのエネルギー消費量 E_2 と CO_2 排出量 C_2 は、走行エネルギー消費量 E_{2R} および CO_2 排出量 C_{2R} とメンテナンスエネルギー消費量 E_{2M} および CO_2 排出量 C_{2M} のそれぞれの和であり、⑨式、⑩式のように定義される。

$$E_2 = E_{2R} + E_{2M} \dots \textcircled{9} \quad C_2 = C_{2R} + C_{2M} \dots \textcircled{10}$$

① 運用

運用における走行エネルギー E_{2R} は、各車両の年間走行距離 D_k (km/年) に各車両の生涯年数 Y_k (年) と走行原単位 R_k (kWh/km・両) および電力原単位 a_j (GJ/kWh) を乗じる⑪式で算出した。 CO_2 排出量 C_{2R} は、 D_k 、 Y_k 、 R_k および CO_2 原単位 b_j (t/kWh) を乗じる⑫式によって算出した。

$$E_{2R} = D_k \cdot Y_k \cdot R_k \cdot a_j \dots \textcircled{11} \quad C_{2R} = D_k \cdot Y_k \cdot R_k \cdot b_j \dots \textcircled{12}$$

走行原単位は、表 4.3-4、4.3.-5 の条件によってシミュレーションした。

表 4.3-4 路線条件

項目	内容
走行区間	赤羽岩淵～四ッ谷間 13.47km
停車駅数	中間駅数 10 駅(両端駅除く)
平均駅間距離	13.47km/11=1.13km
駅間最高速度	80km/h
曲線通過速度	南北線運転曲線による
勾配	南北線運転曲線による
曲線	南北線運転曲線による
軌間	1067mm

表 4.3-5 運転条件

項目	内容
駅停車時分	中間駅 20 秒 端末駅 3 分
加速度	3.3km/h/s
減速度	2.5km/h/s 2.0km/h/s(12km/h 以下)
乗車率	空車
走行抵抗式	$R_t = 2.089 + 0.0394V + 0.000675V^2$ (kg/t) V: 列車速度
曲線抵抗	$R_r = 600/R$ (kg/t) R: 曲線半径
運転方式	Fuzzy 制御 ATO

② メンテナンス

メンテナンスエネルギー E_{2M} は、各車両のメンテナンス工場の年間消費電力量 P_k (kWh) を年間検査両数 M_k (回) で除することにより、各車両の1車両1検査ごとの検査原単位 U_k (kWh/回) を算出し、それに、各車両の生涯検査回数 N_k (回) と電力原単位 a_j (GJ/kWh) で乗じる⑬式によって算出した。 CO_2 排出量 C_{2M} は、 U_k 、 N_k および CO_2 原単位 b_j (t/kWh) を乗じる⑭式によって算出した。ここでは、メンテナンス時に投入する部品等や発生する廃棄物は考慮していない。

$$E_{2M}=U_k \cdot N_k \cdot a_j \cdots \textcircled{13} \quad C_{2M}=U_k \cdot N_k \cdot b_j \cdots \textcircled{14} \quad (U_k=P_k/M_k)$$

(3) 最終廃棄段階

解体作業のエネルギー消費量 E_3 と CO_2 排出量 C_3 は、文献⁶⁾のデータをもとに、解体作業に必要な燃料の種類 j (酸素、軽油、電力等) 別の使用量 W_{3j} (m^3 /両等) に燃料の種類 j 別のエネルギー原単位 a_j (GJ/ m^3 等) および CO_2 原単位 b_j (t/k l 等) をそれぞれ乗じて足し合わせる⑮式、⑯式によって算出した。

$$E_3=\sum (a_j \cdot W_{3j}) \cdots \textcircled{15} \quad C_3=\sum (b_j \cdot W_{3j}) \cdots \textcircled{16}$$

4.3.2 調査結果

1) 製造段階

(1) 素材製造

車両は、鋼、ステンレス鋼、アルミニウムなどの金属類とガラス系、樹脂等の金属以外の材料で構成されている。図4.3-2に各構体の構成材料と重量を示す。アルミニウム構体は、9000系の車両であり、1編成が4M2T (4両は電動機付き電車、2両は付随車) とし、1両あたりに換算した重量を示している。ステンレス鋼構体は、アルミニウム構体をステンレス鋼構体に、鋼構体はアルミニウム構体を鋼構体に変更した時の重量を示している。アルミニウム構体は4.7t、ステンレス鋼構体は4.8t、鋼構体は9.7tとし、その結果、一両あたりの重量は、ステンレス鋼構体を使用した場合にはアルミニウム構体を使用した場合より2.1t、鋼構体を使用した場合にはアルミニウム構体を使用した場合より5t増加する。なお、LCAの計算は金属のみで算出した。

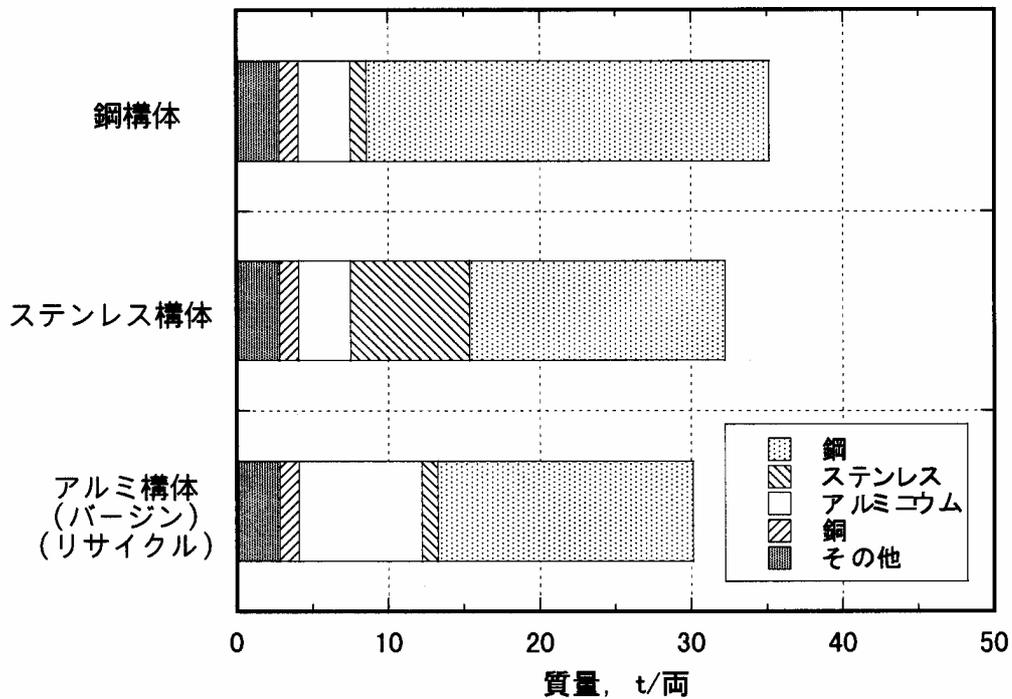


図 2 構成材料

素材製造におけるエネルギー消費量と CO₂ 排出量の結果を図 4.3-3 に示す。再生地金と示しているのは、すべて再生地金を使用した場合である。素材製造では、表 4.3-3 で示したように、新地金を精製するエネルギー消費量と CO₂ 排出量が他の金属材料より高いため、新地金を使用したアルミニウム構体は、ステンレス鋼構体、鋼構体と比較してエネルギー消費量と CO₂ 排出量は大きい。しかし、再生地金を使用したアルミニウム構体は、ステンレス鋼構体、鋼構体と比較してエネルギー消費量と CO₂ 排出量は著しく小さくなる。

(2)加工・組立

加工・組立のデータは文献⁹⁾の値を使用し、すべての車両において同様とした。車両 1 両あたり燃料油（重油と灯油）0.4kl、使用電力量 14,800kWh である。これらの値から換算されるエネルギー消費量および CO₂ 排出量はそれぞれ約 155GJ/両、約 5.8t/両である。

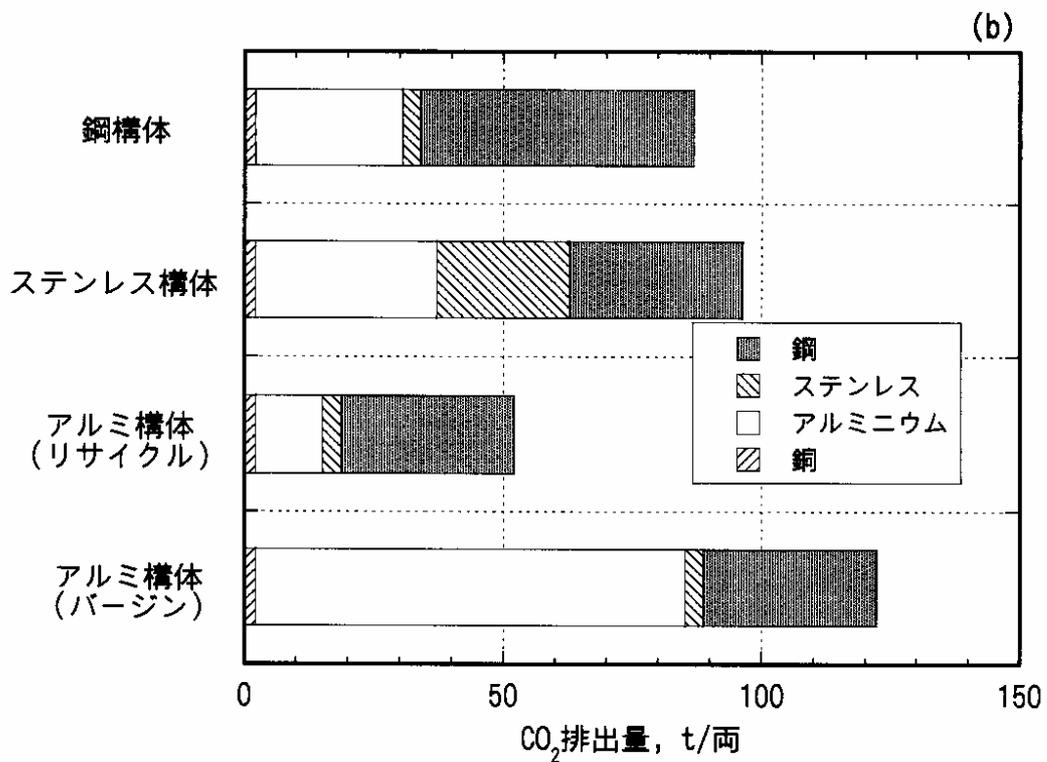
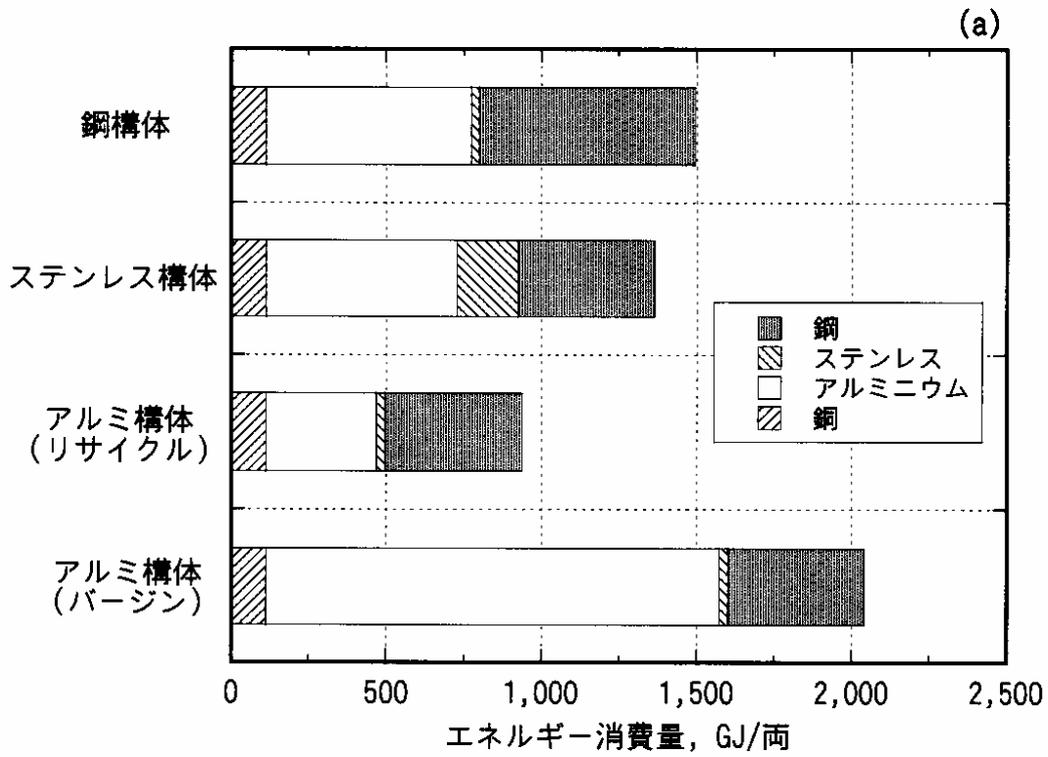


図 3 素材製造における(a)エネルギー消費量と(b)CO₂排出量

2)運用・メンテナンス

運用・メンテナンス段階でのエネルギー消費量とCO₂排出量を算出するために、営団殿の走行実績から年間走行距離 10.8 万 km、車両の生涯使用年数を 30 年とし、年間走行距離に生涯使用年数を乗じ、生涯走行距離 324 万 km を算出した。9000 系の検査は、新造時が 4 年で検査をし、その後、3 年で重要部検査、6 年で全般検査が行われる。このことから、生涯検査回数は 9 回とした。重要部検査と全般検査のエネルギー消費量と CO₂ 排出量は同様とし、また、それらのデータはすべての車両において同様とした。生涯メンテナンス回数には、日常的に行われる検査は含まれていない。

(1)運用

図 4.3-4 に走行における (a)エネルギー消費量と (b)CO₂ 排出量の結果を示す。アルミニウムの車両構体が、鋼、ステンレス鋼に変化することにより、車両の重量が増加し、その結果、走行時のエネルギー消費量と CO₂ 排出量は増加する。9000 系の場合、アルミニウム構体が鋼構体になると、一両あたりの車両重量は 5t すなわち約 17%増加することになり、その結果、走行時のエネルギー消費量と CO₂ 排出量はそれぞれ約 10%増加する。また、アルミニウム構体がステンレス鋼構体になると、一両あたりの車両重量は 2.1t すなわち約 7%増加することになり、その結果、走行時のエネルギー消費量と CO₂ 排出量はそれぞれ約 4%増加する。

図 4.3-5 に走行距離に対する (a)エネルギー消費量と (b)CO₂ 排出量の関係を示す。走行距離 0 は、製造時のエネルギー消費量や CO₂ 排出量を示している。新地金アルミニウムは鋼やステンレス鋼と比較して、製造時のエネルギー消費量や CO₂ 排出量が大きいため、アルミニウム構体を使用すると製造時のそれらは大きくなるが、車両が軽量化されるため、走行時のそれらは小さくなる。新地金を使用したアルミニウム構体のエネルギー消費量は、走行距離が約 51 万 km (約 5 年) で鋼構体より、走行距離が約 153 万 km (約 14 年) でステンレス鋼構体より小さくなる。新地金を使用したアルミニウム構体の CO₂ 排出量は、走行距離が約 80 万 km (約 8 年) で鋼構体より、走行距離が約 141 万 km (約 13 年) でステンレス鋼構体より小さくなる。再生地金を使用すれば、製造時や走行時のエネルギー消費量は最も低くなる。

各車両構体において、走行時の消費電力量から、1 両あたりの電気料金の算出を試みた。電気料金は 1kWh あたり 10 円と仮定した。表 4.3-6 に走行距離と電気料金との関係を示す。生涯走行距離 324 万 km では、アルミニウム合金構体はステンレス鋼構体より約 150 万円、鋼構体より約 370 万円電気料金の節約になる。軽量化に伴う電気料金の節約効果は大きい。

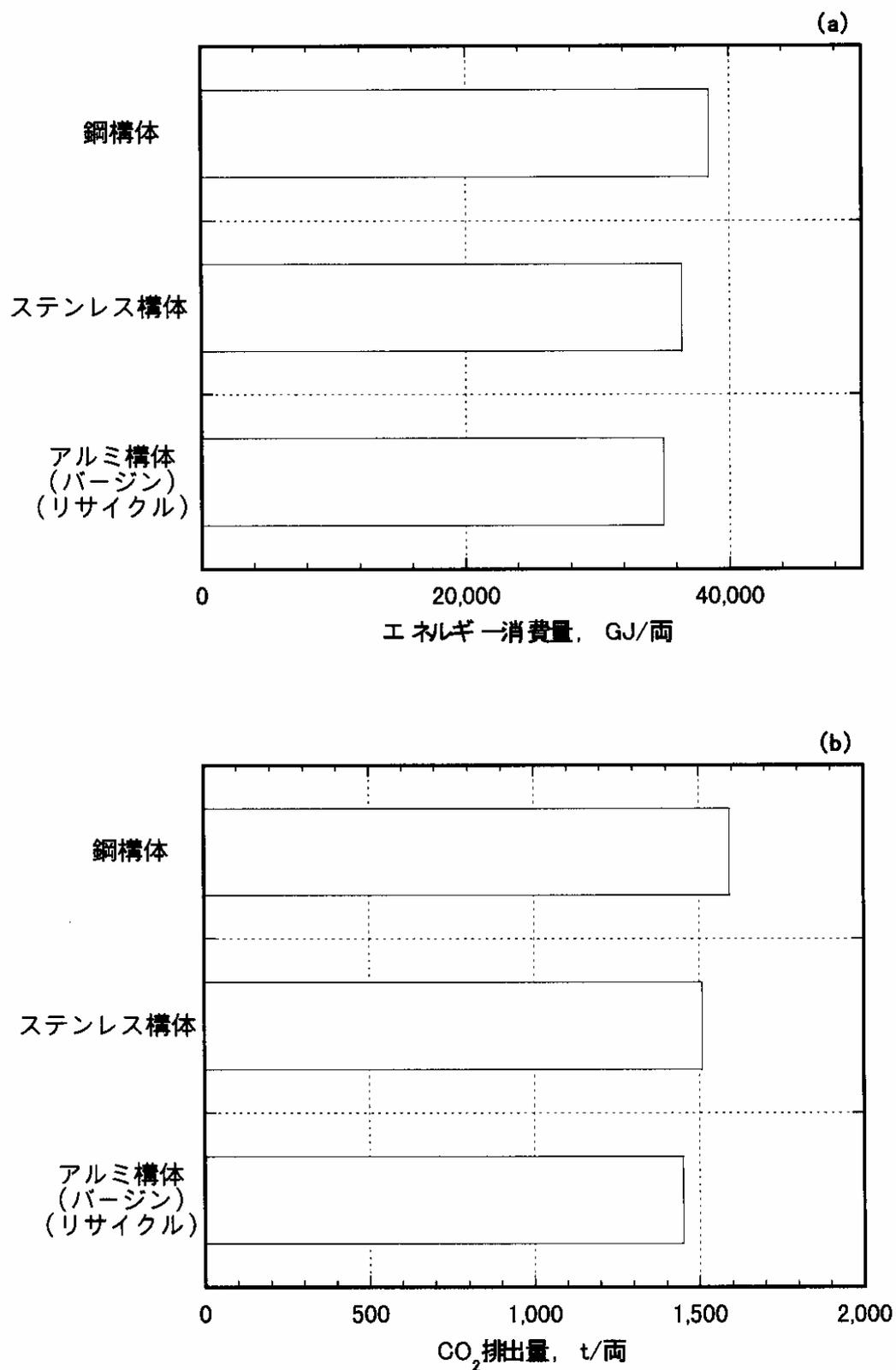


図 4 走行における(a)エネルギー消費量と(b)CO₂排出量

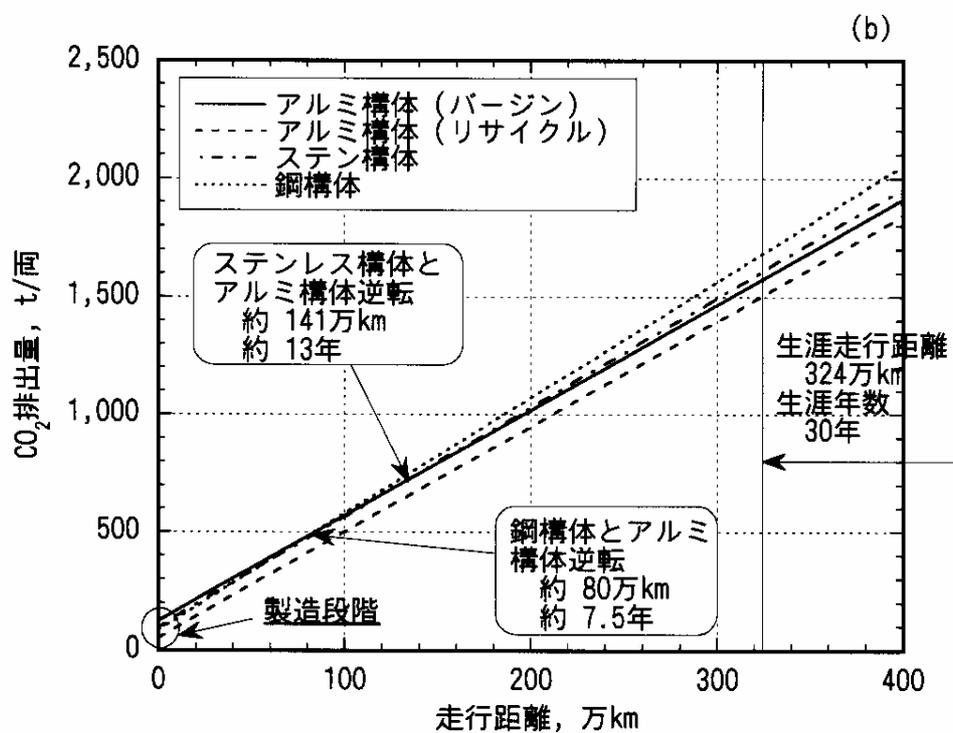
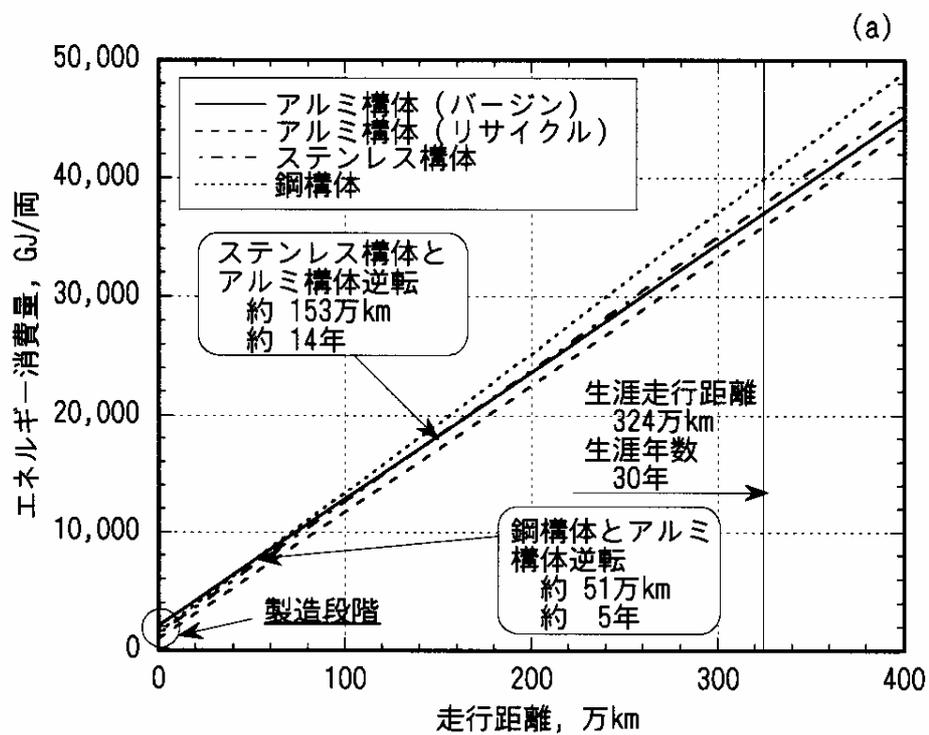


図 5 走行距離に対する(a)エネルギー消費量と(b)CO₂排出量

表4.3-6 走行距離と電気料金の関係(1両あたり)

走行距離, 万km	100	200	300	324
アルミニウム合金構体	¥11,420,440	¥22,840,881	¥34,261,321	¥37,002,227
ステンレス鋼構体	¥11,887,130	¥23,774,260	¥35,661,390	¥38,514,301
鋼構体	¥12,554,130	¥25,108,260	¥37,662,390	¥40,675,381

10 円/kWh で算出

(2) メンテナンス

メンテナンス時におけるエネルギー消費量と CO₂ 排出量は、車両の検査・修繕を行う工場において年間の消費電力量を検査両数で除すことによって、車両 1 両あたりの消費電力量を求めた結果、約 20,520kWh/両・回と算出された。この値を生涯エネルギー消費量と CO₂ 排出量に換算すると 1,745GJ/両および 72.4t/両になる。これらはすべての車両において同様とした。

3) 最終廃棄段階

鉄道車両は老朽化に伴い、解体され処分される。この車両解体時のデータは文献⁵⁾の値を使用し、すべての車両において同様とした。解体に使用される燃料は酸素 875m³, LPG 0.02t, 軽油 0.127kl であり、消費電力量は 500kWh である。これらの値から換算されるエネルギー消費量および CO₂ 排出量はそれぞれ約 18GJ/両、約 0.62t/両である。

4) LCE と LCCO₂

図 4.3-6 に LCE と LCCO₂ を示す。鋼構体は新地金を使用したアルミニウム構体より、LCE は約 8%、LCCO₂ は約 7%、ステンレス鋼構体は新地金を使用したアルミニウム構体より LCE、LCCO₂ とも約 2%増加しており、アルミニウム構体を使用することによる軽量化の効果は大きいと考えられる。また、再生地金を使用したアルミニウム構体は、新地金を使用したアルミニウム構体より、LCE は約 3%、LCCO₂ は約 4%低減しており、再生地金を使用することによる LCE や LCCO₂ の低減効果は大きい。

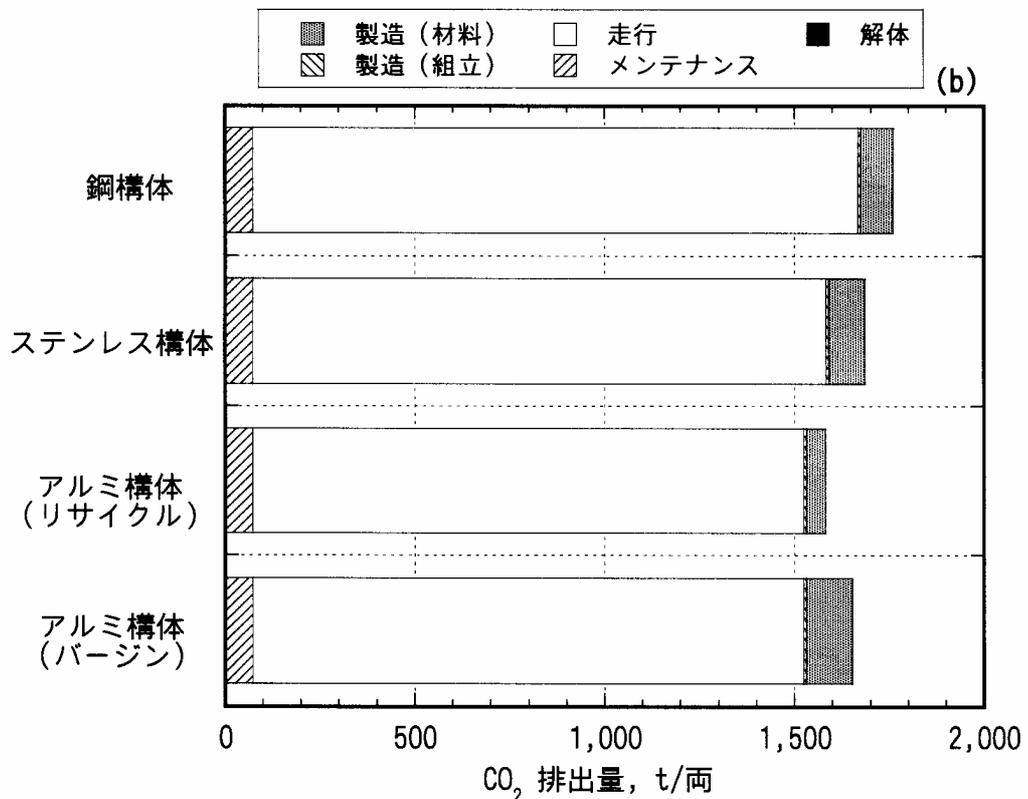
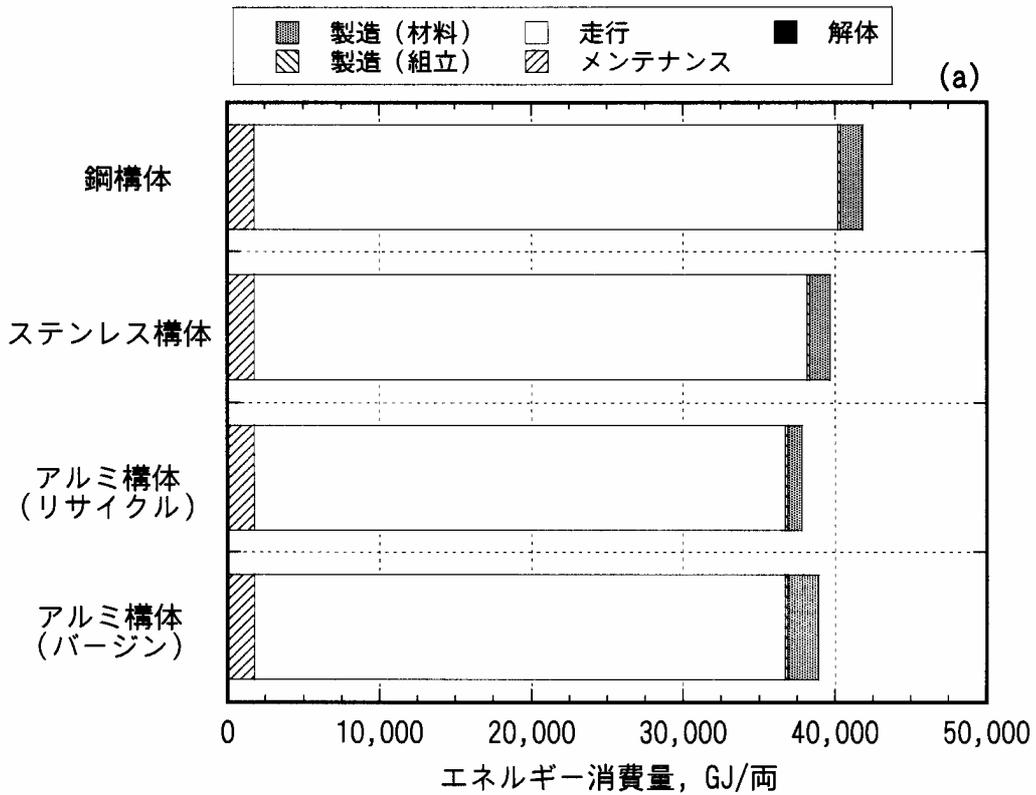


図 6 (a) LCE と (b) LCCO₂

4. 4 まとめ

- (1) アルミニウム車両の台数は年々増加しており、1999年には累積生産台数が1万両を超えると予想されている。車両のアルミニウム化による使用電力量の低減も明確に認識されており、LCA的観点からも鉄道車両のアルミニウム化は意義がある。
- (2) 鉄道車両に使われるアルミニウム部品の使用量やアルミニウム化率は約30年変化しておらず、個々の部品のアルミニウム化は限界と考えられる。それゆえ、鉄道車両においては、車両構体自体をステンレス鋼や鋼からアルミニウムに変えることにより、鉄道車両のアルミニウム化率上昇させる必要がある。
- (3) 現在、ステンレス鋼構体車両は年間製造車両数ではアルミニウム構体車両を上回っている。アルミニウム構体車両の需要促進のためには、リサイクル性を増すためにA6N01合金への単一合金化などを検討し、再生地金の多量使用によるアルミニウム製造コストの削減、必要がある。また、アルミニウム素材のデリバリーの迅速化や溶接性の向上による車体組立てコスト低減なども課題と考えられる。
- (4) 営団地下鉄の9000系二次車（以下9000系）をベースにエネルギー消費量やCO₂排出量に関してLCAを実施し、リサイクル材の使用や車両構体材料の変更がLCAに及ぼす影響を調べた結果、以下のことがわかった。
- ①LCEとLCCO₂はいずれの車両もエネルギー消費量とCO₂排出量の約90%は走行によるものであり、それらの総量を低減させるためには省エネルギー電車を使用することが最も重要である。
 - ②9000系では、車両構体の軽量化や再生地金アルミニウムを使用することによるLCEやLCCO₂の低減効果は大きい(表4.3-7参照)。
 - ③9000系では、車両構体の軽量化による走行時の電気料金の節約効果は大きい(表4.3-8参照)。

表 4.3-7 LCA 比較

車両構体材質	構体重量 t	1 車両重量 t	重量割合 %	LCE %	LCCO ₂ %
アルミニウム合金	4.7	30.13	100	100	100
アルミニウム合金(再生地金)	4.7	30.13	100	97	96
ステンレス鋼	6.8	32.23	107	102	102
鋼	9.7	35.13	117	108	107

表4.3-8 アルミニウム合金を基準とした電気料金(1両あたり)

走行距離, 万km	100	200	300	324
ステンレス鋼	¥466, 690	¥933, 379	¥1, 400, 069	¥1, 512, 074
鋼	¥1, 133, 690	¥2, 267, 379	¥3, 401, 069	¥3, 673, 154

4. 5 参考文献

- 1) (財)クリーン・ジャパン・センター、(社)軽金属協会：製品アセスメント個別指導作成（アルミニウム合金製鉄道車両）（平成10年3月）
- 2) 太田朝道：アルミニウム, 4(1997), 500
- 3) 帝都高速度交通営団資料
- 4) 留岡正男：軽金属溶接, 30(1998), 379
- 5) たとえば、宮本重幸：電子機器製品のための LCA システムの提案、第 3 回エコバランス国際会議、(1998)、267-269
たとえば、小林紀：乗用車におけるライフサイクル分析、第 3 回エコバランス国際会議、(1998)、287-290
- 6) 小関康雄：車両技術、(社)日本鉄道車輛工業会、213号(1997)、120
- 7) 宮内瞳苗、永友貴史他：鉄道総研報告、第12巻、第10号、(1998)、5-14
- 8) 軽金属車両委員会：パンフレット、p2
- 9) 金属材料技術研究所：Environmental load of 4000 social stocks
- 10) (財)未踏科学技術研究会、エコマテリアル研究会：環境負担性評価システム構築のための基礎調査研究、1995、67-70
- 11) 産業環境協議会：ライフサイクルアセスメントにおける基礎素材の製造データ環境管理、31(1995)、616-627
- 12) NEDO・RITE・化学工学会：化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査 I 及び II、NEDO-GET-9310-1, 2、(1994)

5. おわりに

今回の調査結果からアルミニウムのリサイクル効果及び軽量化効果がより明確になった。調査対象の缶材・自動車材・鉄道車両材のインベントリデータは、いずれもアルミニウムのリサイクル率が低い(=新地金使用率が高い)と劣っており、リサイクル率の上昇(=再生地金使用率の上昇)と共にアルミニウム材使用の優位性が顕著になった。例えば 缶材を例にとると精錬時に使用される電力エネルギーが非常に高いため地金製造までのエネルギー使用比率が72%を占めリサイクル率が40%を超えてはじめてスチール缶より優位になる。缶材以外の他分野についてもリサイクルシステムの体制確立が緊要と考えられる。

また、自動車や鉄道車両へのアルミニウム使用による軽量化は、エネルギー消費量の低減効果が大きいことも確認された。

今後は 下記のような観点からインベントリデータの整備を急ぎたい。

- (1) 本年に予定されている改正省エネルギー法の施行に併せてトップランナー方式の考え方が浸透すれば ユーザーにおける使用材料の比較評価と材料選別見直しの動きが強まり材料別インベントリデータの提出を要請されることが予測される。
- (2) 今後生産量の大幅増が期待薄の状況の中で省エネ自主行動計画を達成するためには、更に一段と省エネ対策を講じる必要がありより精緻なLCAデータの解析と見直しを行い各工程のプロセス改善に結び付けることが重要となっている。

現在 (社)日本アルミニウム連盟のLCA委員会からも出席しているLCAプロジェクト「インベントリ研究会WG-1」では、国内の23業界の代表が参加し「日本において共通使用できるパブリックインベントリデータ集の構築」を検討中である。また同様に上記委員会から出席している「新たな環境ラベル協議会」では 製品の環境負荷に関する情報を提供する「環境ラベルの新たな方式」を検討している。今後アルミニウムの優位性をアピールするため 環境情報を積極的に提供できる体制を確立する必要があり平成11年度はこのためのシステム構築を図って行く予定である。

今回の調査を遂行するにあたり アルミ缶リサイクル協会、(社)軽金属協会・自動車委員会及び(社)軽金属協会・車両委員会等のご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。