

CFRPによる 軽量化乗用車のLCA

16284 鈴木徹也

東京大学大学院工学系研究科
環境海洋工学専攻安全評価工学研究室

発表の流れ

研究の背景

現状のCFRPを用いた場合のLCA

他の軽量化材料のポテンシャル

CFRPによる環境負荷低減の技術開発目標

結論

発表の流れ

研究の背景

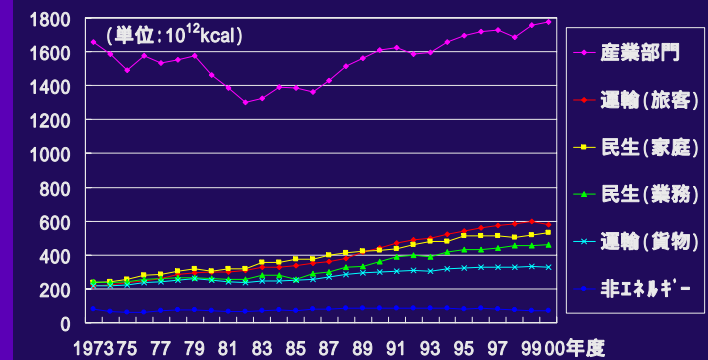
現状のCFRPを用いた場合のLCA

他の軽量化材料のポテンシャル

CFRPによる環境負荷低減の技術開発目標

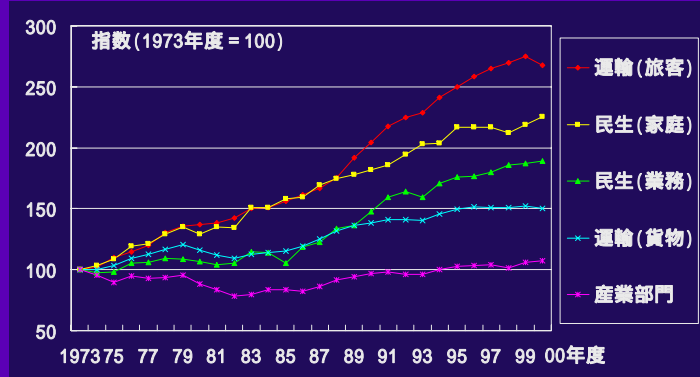
結論

部門別最終エネルギー消費量の推移



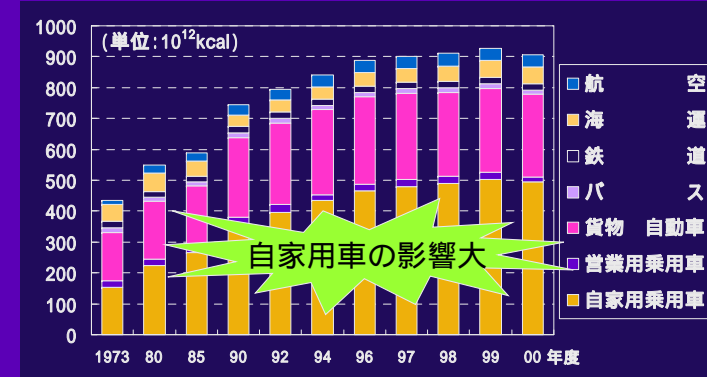
資料:EDMC,「総合エネルギー統計」

部門別最終エネルギー消費量の推移



資料:EDMC,「総合エネルギー統計」

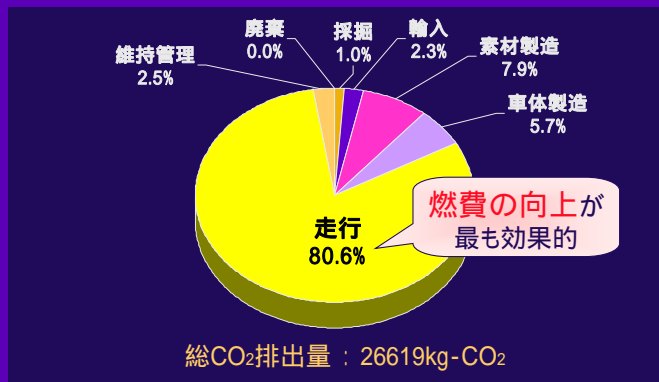
輸送機関別エネルギー消費量の推移



資料:EDMC,「総合エネルギー統計」

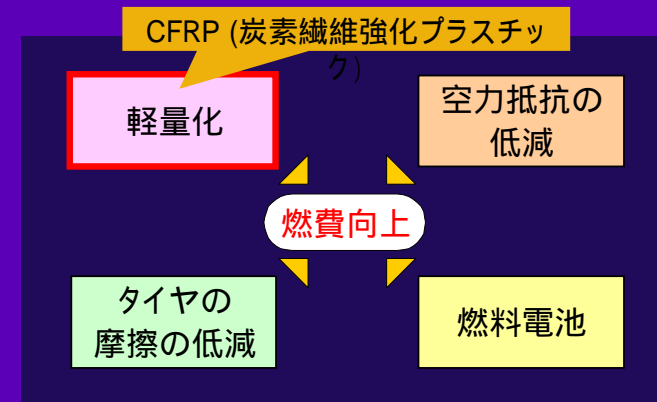
自家用車の影響大

各ステージでのCO₂排出量

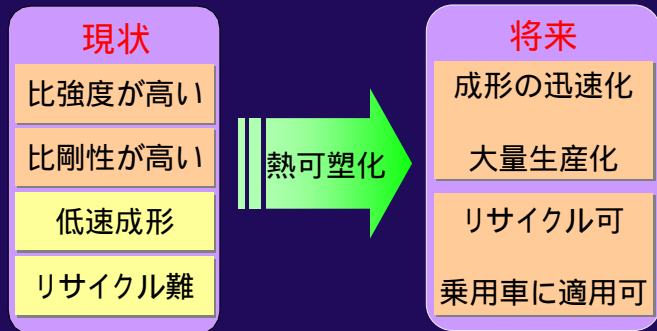


資料:産業技術審議会,「リチウム電池を対象にしたライフサイクルアセスメントの実施」

燃費を向上させる手段

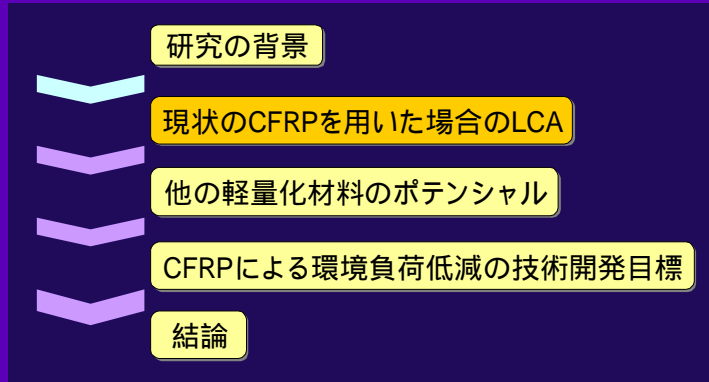


なぜCFRPか？

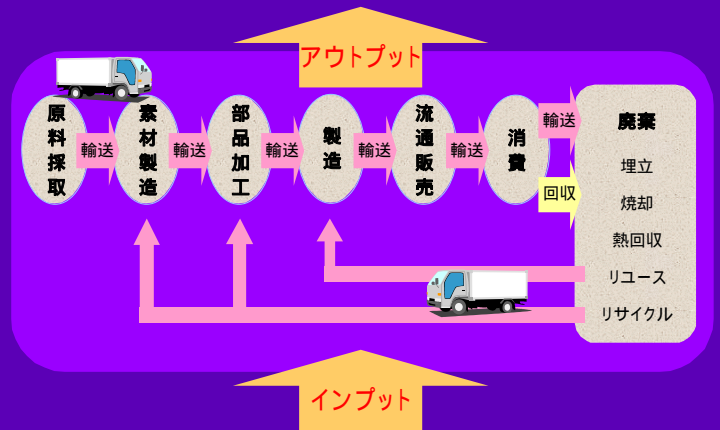


LCAを用いて技術開発目標を評価

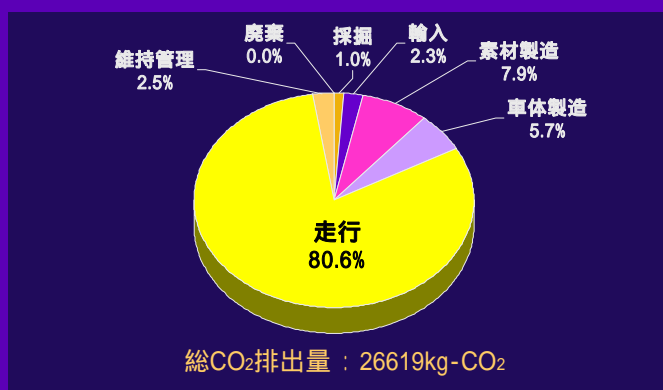
発表の流れ



自動車のライフサイクル



各ステージでのCO₂排出量



資料 : 産業技術審議会, 「リチウム電池を対象にしたライフサイクルアセスメントの実施」

LCAの初期設定(1)

■ 実施目的

さまざまな軽量素材により乗用車を軽量化したとき、従来車よりどれだけ環境負荷が低減するかを、比較調査する

■ 評価対象製品

排気量2000cc、車重1286.5kgのガソリン車

■ 機能単位及び基準フロー

機能単位を「排気量2000ccで10万km走行可能」とし、それを満たすガソリン乗用車1台を基準フローとする

LCAの初期設定(2)

■ システム境界

素材製造、部品・車体の製造、走行の3段階、
ただし、素材製造には原料の採掘・輸送を含む

■ 環境負荷項目

エネルギー消費量及びCO₂排出量

製造原単位

	エネルギー消費量 (MJ/kg)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /kg)
鉄	33	2.6
現在 CFRP	460	30
将来 CFRP	230	15

CFRPの原単位は将来的に半減

従来車の環境負荷

	エネルギー消費量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)
素材製造	60,000	3,000
車体製造	30,000	1,500
走行	320,000	21,000

燃費：10・15モードで0.091L/km
(11km/L)

資料：産業技術審議会、
「リチウム電池を対象にしたライフサイクルアセスメントの実施」

CFRP代替に伴う設定

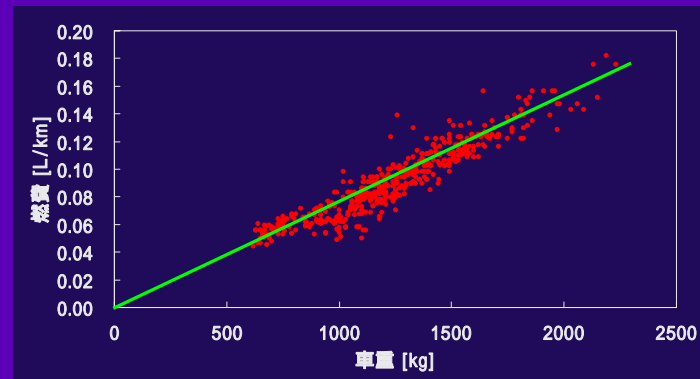
■ 素材製造段階

鉄100kgをCFRP60kgで代替できると仮定, 1台あたり鉄600kgまでCFRPで代替(軽減率:20%)

■ 車体製造段階

鉄100kg減少あたり10%の負荷減と仮定

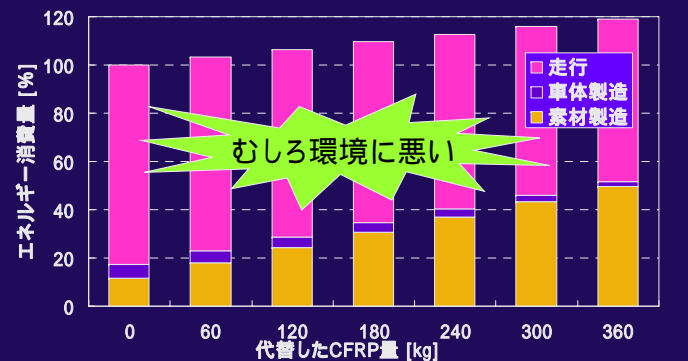
車重と燃費の関係



資料: 交通分析情報センター

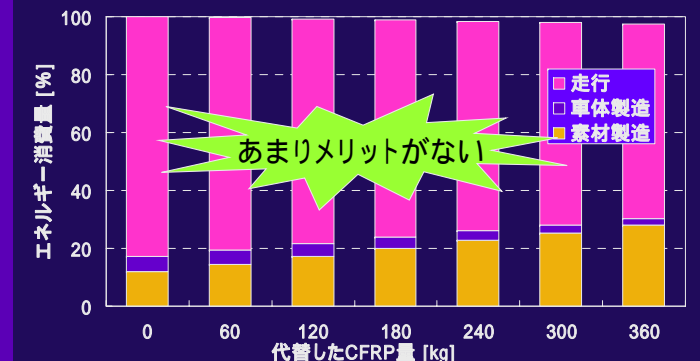
エネルギー消費量の変化

(原単位: 460MJ/kg)

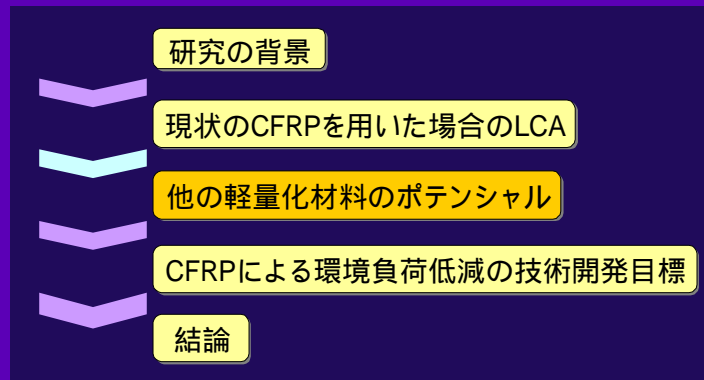


エネルギー消費量の変化

(原単位: 230MJ/kg)



発表の流れ



アルミニウムによる軽量

■ 素材製造段階

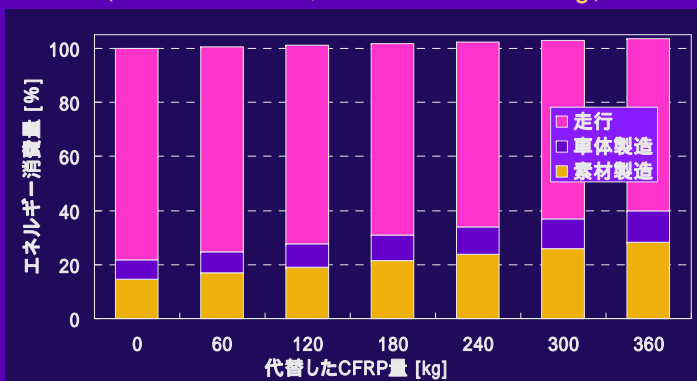
- ◆ 強度優先: アルミ1kg 鉄1.66kg ~ 1.87kg
- ◆ 剛性優先: アルミ1kg 鉄2kg
- ◆ 鉄100kgあたりアルミ60kgの割合で、鉄600kgまで代替と仮定(軽減率: 20%)

■ 車体製造段階

鉄とアルミの加工エネルギーの比(1:1.5)を用いて鉄100kg減少あたり10%増加と仮定

エネルギー消費量の変化

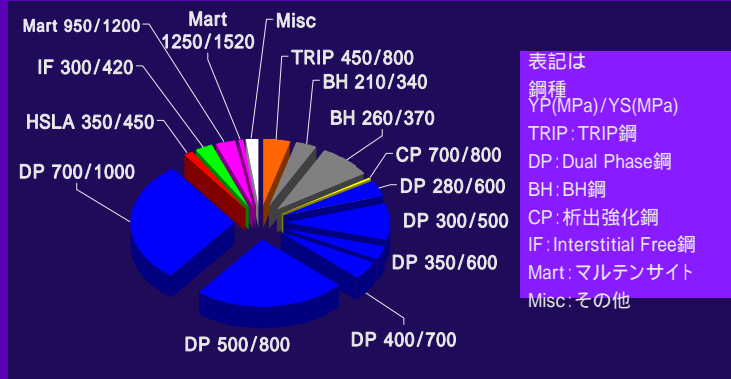
(アルミニウム, 原単位: 205MJ/kg)



アルミニウム軽量車のポテンシャル

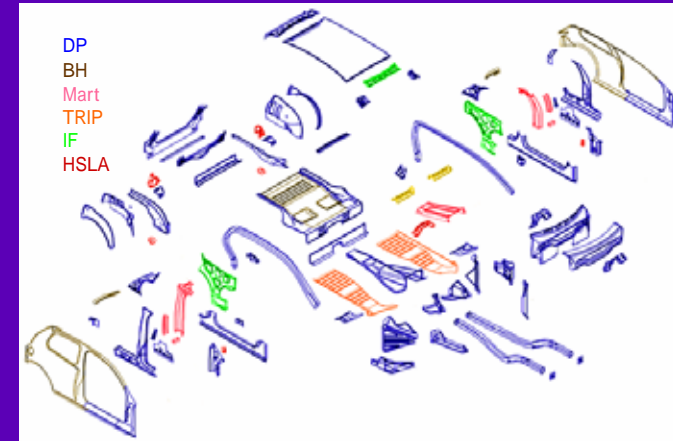
- バージン材は原単位が大きすぎるので、原単位が43MJ/kgのリサイクル材を用いることが必要
- 従来車に用いられているアルミは全重量の約7%で、ほとんどがリサイクル可能な鋳造材
- 本格的な軽量化に用いるのは鍛造材であり、鋳造材と違ってリサイクル材を用いるのは困難
- 様々な品種、使用形態(板, 押出し, 鋳造材)のアルミ合金を確実に選別するリサイクルシステムの構築が必要

ハイテン軽量車の使用鋼材種類と使用比率



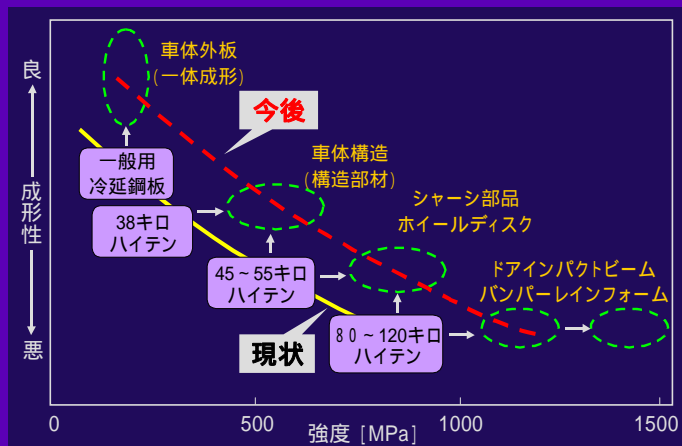
資料: ULSAB-AVC

ハイテン軽量車の使用鋼材部位



資料: ULSAB-AVC

鉄鋼の強度と成形性の関係



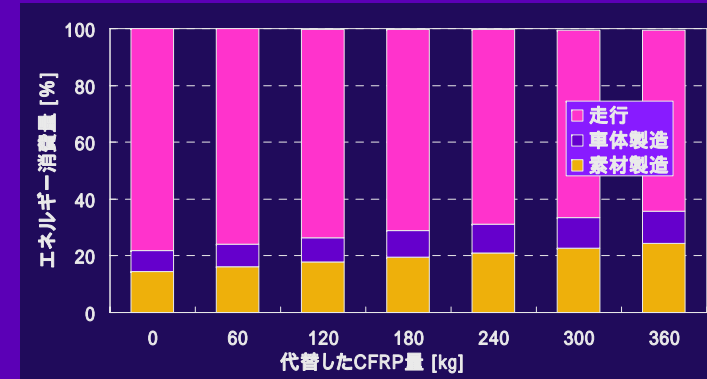
ハイテン軽量車のポテンシャル

- 他の材料に比べ、もともと製造原単位が小さいので、軽量化への期待は大きい
- 高強度化で悪化する加工性を改善する、組織強化型ハイテン材の開発が必要
- 迅速加工成形方法の開発が必要

マグネシウムによる軽量

- 実用金属材料中で最も軽く、比強度、比剛性も鉄やアルミに劣らない
- アルミニウムでの軽量化条件と同じと仮定

エネルギー消費量の変化 (マグネシウム, 原単位: 165MJ/kg)



マグネシウム軽量車のポテンシャル

- バージン材は原単位が大きすぎるので、原単位が45MJ/kgのリサイクル材を用いることが必要
- 従来車に用いられているマグネは全重量の1%未満で、ほとんどがリサイクル可能な鋳造材
- 本格的な車体の軽量化に用いるのは鍛造材であり、これはリサイクル材を用いるのが困難
- 低コストで高信頼性の鋳造技術、溶接・接合技術の確立が必要

GFRP軽量車のポテンシャル

- バージン材の原単位は42MJ/kgであり、鉄鋼とそれほど変わらないので、LCA的には期待が大きい
- 鉄鋼などよりも比剛性が劣るので、メインの軽量化材に用いるのは困難

発表の流れ

研究の背景

現状のCFRPを用いた場合のLCA

他の軽量化材料のポテンシャル

CFRPによる環境負荷低減の技術開発目標

結論

自動車リサイクル

2015年のリサイクル率: 95%

(うち10%は熱回収可)

1286.5kgの車でゴミは64kgまで

(熱回収は129kg)

リサイクルを前提とした
原単位での議論が必要

3R後のCFRPの原単位

$$L_{3R} = \eta_v \cdot L_v + \eta_w \cdot L_w + \eta_t \cdot L_t + \eta_r \cdot L_r + \eta_u \cdot L_u$$

	比率 (wt%)	原単位
バージン材	η_v	L_v
廃棄	η_w	L_w
熱回収	η_t	L_t
リサイクル	η_r	L_r
リユース	η_u	L_u

$$\eta_v = \eta_w + \eta_t, \quad \eta_w + \eta_t + \eta_r + \eta_u = 1$$

マテリアルリサイクル原単位の目標値

$$L_{3R} = \eta_v \cdot L_v + \eta_w \cdot L_w + \eta_t \cdot L_t + \eta_r \cdot L_r + \eta_u \cdot L_u$$

η_v : バージン材使用率 L_v : バージン材の原単位
 $(= \eta_w + \eta_t) = 0.15$
 η_w : 廃棄率 = 0.05 L_w : 廃棄時の原単位 0
 η_t : 熱回収率 = 0.1 L_t : 熱回収時の原単位 = -30MJ/kg
 $= 3\text{kg-CO}_2/\text{kg}$
 η_r : リサイクル率 = $0.85 - \eta_u$ L_r : リサイクル時の原単位
 η_u : リユース率 L_u : リユース時の原単位 0
 $(\eta_w + \eta_t + \eta_r + \eta_u = 1)$

$$L_r = \frac{L_{3R} - 0.15 L_v + 3}{0.85 - \eta_u}$$

(エネルギー消費量について)

素材製造までのエネルギー消費量を同じにする条件

$$L_{3R} = \frac{L_c}{\eta_c}$$

L_c : 従来製品(鉄)の原単位
 η_c : 素材代替率(重量比)



$$L_r = \frac{L_{3R} - 0.15L_v + 3}{0.85 - \eta_u}$$

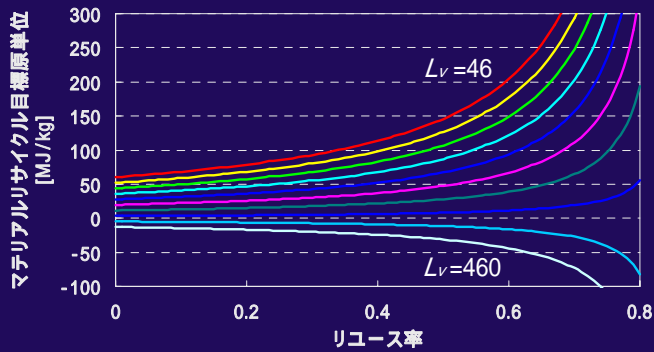
3Rの目標値

$$L_r = \frac{L_c / \eta_c - 0.15L_v + 3}{0.85 - \eta_u}$$

L_v : バージン材の原単位 = 46 ~ 460 (MJ/kg)
 L_c : 従来製品(鉄)の原単位 = 33 (MJ/kg)
 η_c : 素材代替率(重量比) = 0.6, 0.4
 η_u : リユース率(wt%) = 0 ~ 0.8

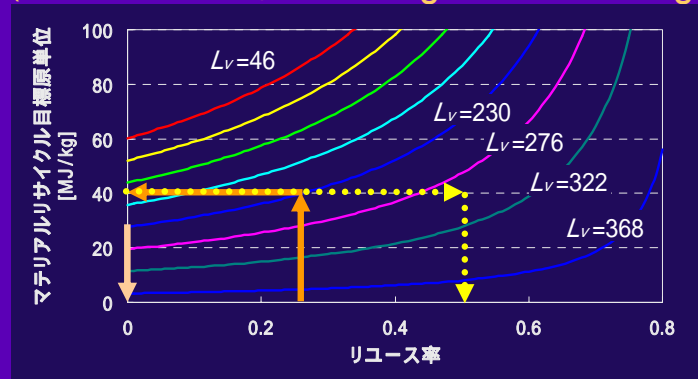
3Rの目標値

(代替率: 0.6, 鉄100kg CFRP60kg)

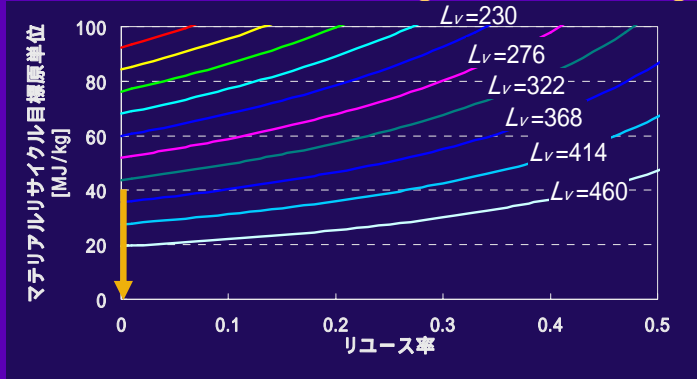


3Rの目標値

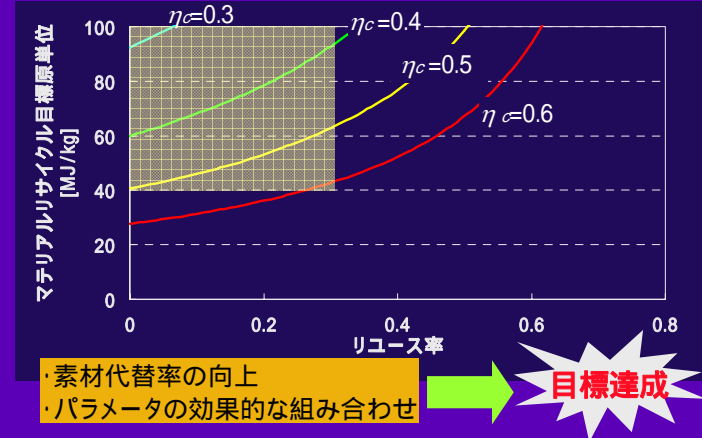
(代替率: 0.6, 鉄100kg CFRP60kg)



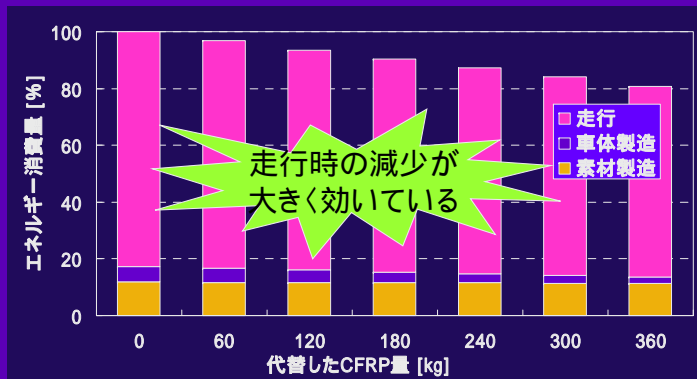
3Rの目標値 (代替率:0.4, 鉄100kg CFRP40kg)



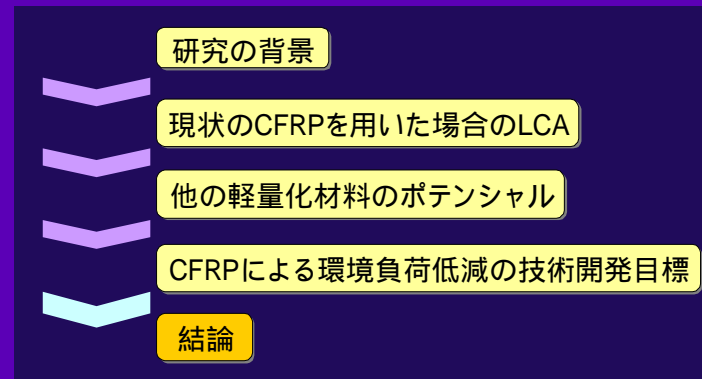
代替率による限界目標値の変化 (原単位: 230MJ/kg)



エネルギー消費量の変化 (CFRPをリサイクルした場合)



発表の流れ

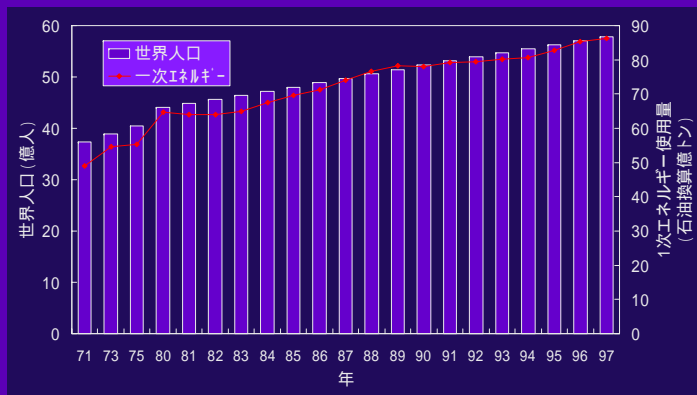


結論

- 輸送機器の環境負荷の大部分は走行時に生じるので、車体軽量化による燃費の向上が効果的
- 原単位が大きいと素材製造時の負荷増加が走行時の負荷減少を相殺してしまう
- 金属は不純物の混入によりリサイクル困難であるのに対し、リサイクル可能な熱可塑性のCFRPの技術開発は期待が大きい
- 鉄をより少ないCFRPで置き換えることができたり、乗用車の生涯走行距離が伸びれば、軽量化による環境負荷の低減効果はより大きくなる

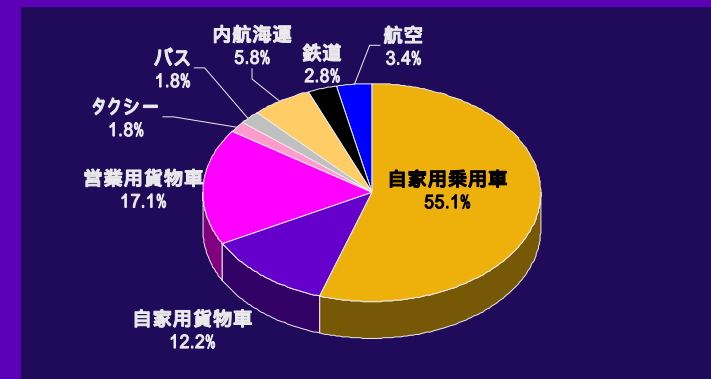
CFRP軽量乗用車の開発は、将来的に大きなポテンシャルを持つ環境対策技術

世界の1次エネルギー使用量の推移



資料:通産省,EDMC「総合エネルギー統計」

輸送機関別のCO₂排出量



出典:運輸省調べ(1997年度)

CFRPの力学特性

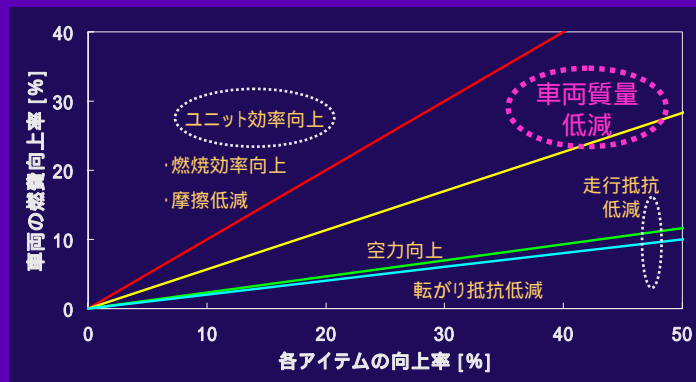
	熱延高張力鋼	冷延高張力鋼	アルミニウム	CFRP
引張強度(MPa)	540 ~ 780	340 ~ 540	~ 550	900 ~ 1800
比重(kN/m ³)	76	76	27	16
比強度(10 ³ m)	7.1 ~ 10.0	4.5 ~ 7.1	~ 20	56 ~ 113
比剛性(10 ⁶ m)	2.8	2.8	2.6	4.3 ~ 8.6

CFRPの比強度・比剛性は鉄に劣らない

様々な材料の特性比較

材料	強度 (MPa)	比強度 (10 ³ m)	剛性 (GPa)	比剛性 (10 ⁶ m)	密度 (kN/m ³)
鉄鋼 (SS400)	400	5.3	210	2.8	76
鉄鋼 (SK5)	1370	18	210	2.8	76
Al合金 (6013-T6)	360	13	70	2.6	27
Mg合金 (AZ91E - T6)	275	15	45	2.5	18
GFRP	1000	50	42	2.1	20
CFRP	1750	103	125	7.4	17

燃費向上アイテムの効果

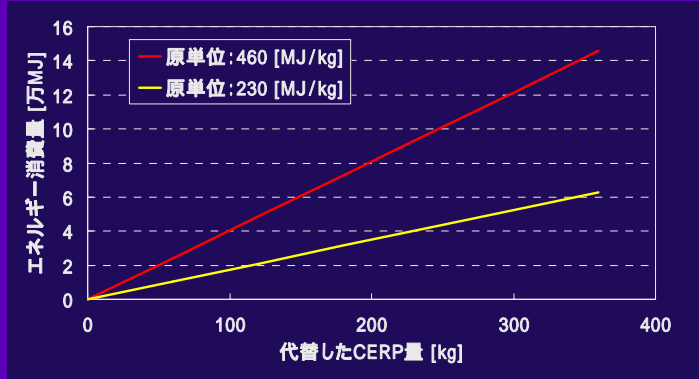


資料: Audi

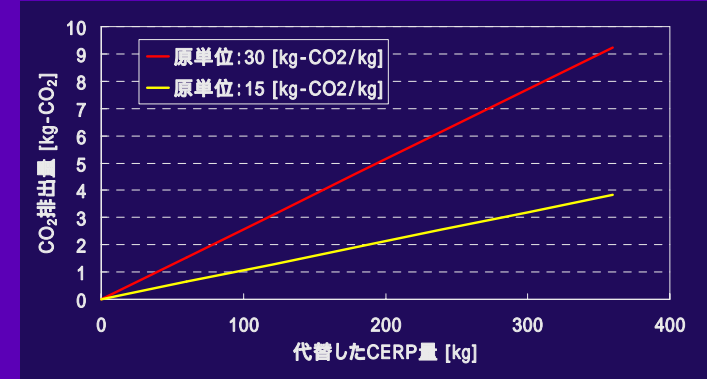
Ford実験車の炭素繊維 - 樹脂複合材料製 主要部品の質量比較 (1979年)

部品	鋼製 (kg)	CFRP製 (kg)	削減量 (kg)	削減量 (%)
車体	192.3	72.7	115.0	62.2
フレーム	128.6	93.6	35.0	27.2
フロントエンド	43.2	13.6	29.5	68.5
フード	22.3	7.8	14.7	65.0
デッキリッド	19.5	6.5	13.1	66.7
バンパ(2)	55.9	20.0	35.9	64.2
車輪(5)	41.7	22.3	19.4	46.5
ドア(4)	64.1	25.2	38.9	60.7
ドライブシャフト	9.6	6.8	2.8	29.2
鋼製部重量	577.2	268.5	304.3	53.5
全重量	1705	1138	567	33.3

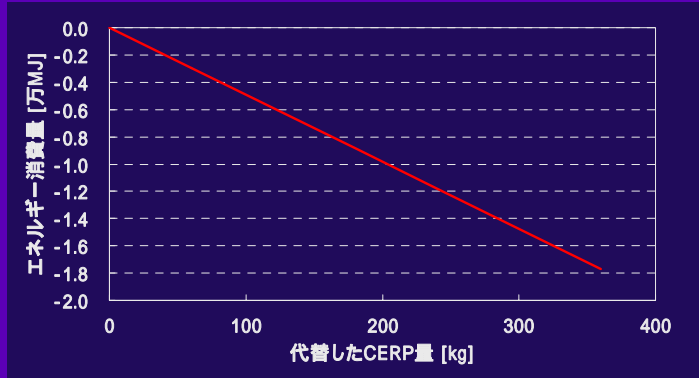
エネルギー消費量の変化 (素材製造段階)



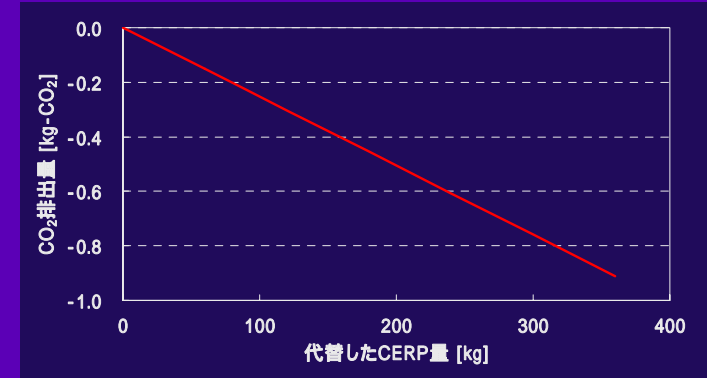
CO₂排出量の変化 (素材製造段階)



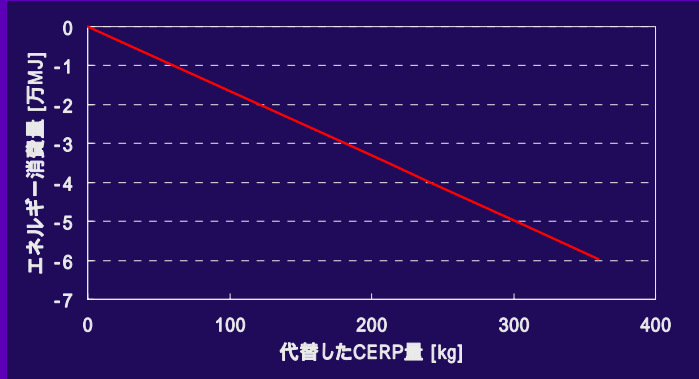
エネルギー消費量の変化 (車体製造段階)



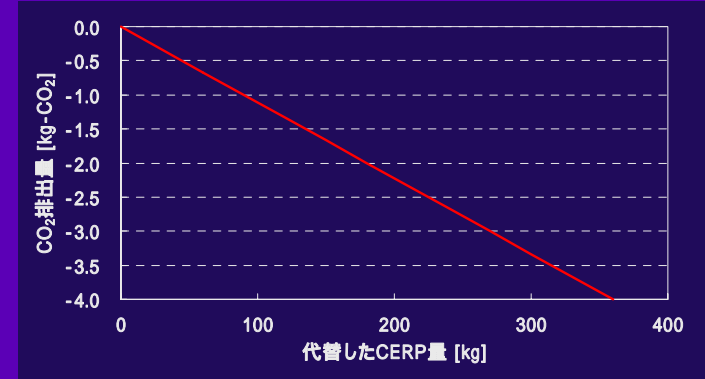
CO₂排出量の変化 (車体製造段階)



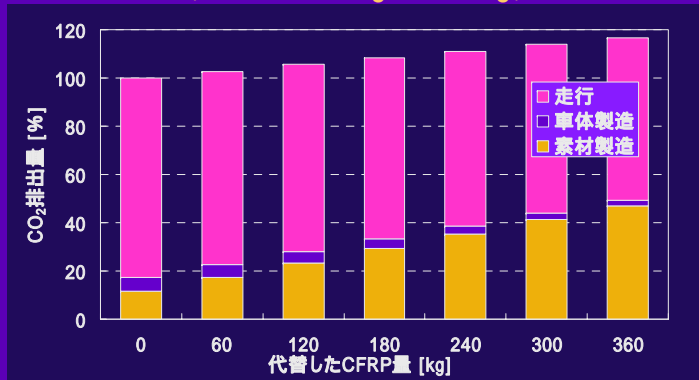
エネルギー消費量の変化 (走行段階)



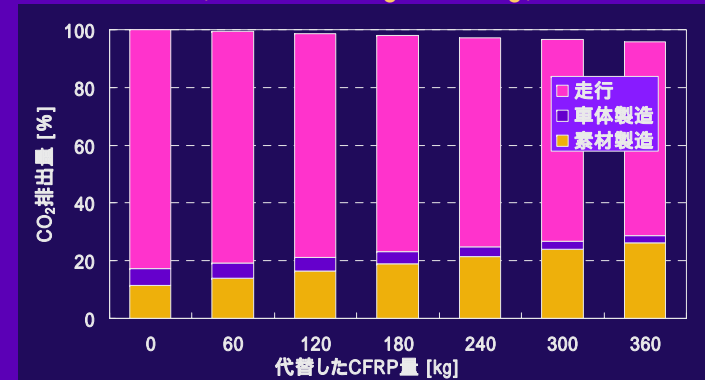
CO₂排出量の変化 (走行段階)



CO₂排出量の変化 (原単位: 30kg-CO₂/kg)



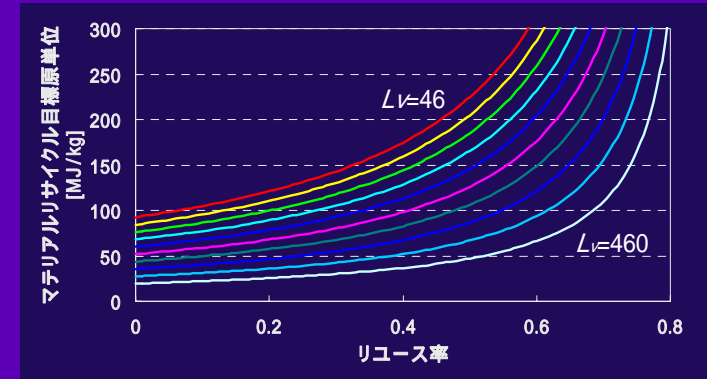
CO₂排出量の変化 (原単位: 15kg-CO₂/kg)



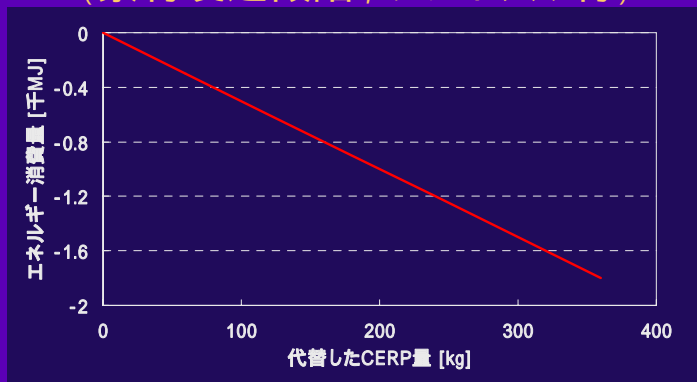
リサイクルを考えないときのLCA結果

- 原単位: 460MJ/kgのとき
車体製造段階と走行段階で減少するが、それ以上に素材製造段階で増加するので、
トータルでは増加 **むしろ環境に悪い**
- 原単位: 230MJ/kgのとき
車体製造段階と走行段階の減少で、素材製造段階の増加を吸収でき、トータルではわずかに減少 **あまりメリットがない**

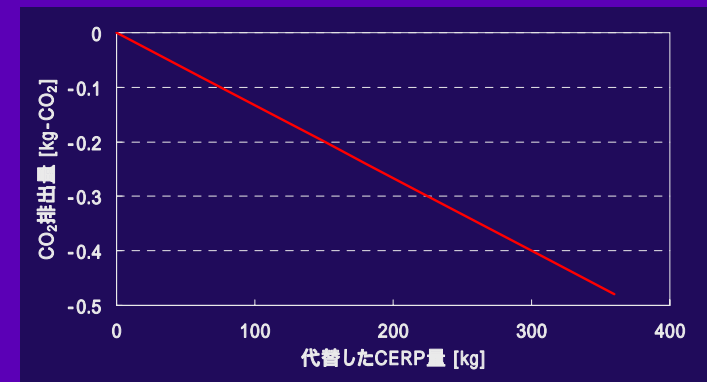
3Rの目標値(代替率:0.4)



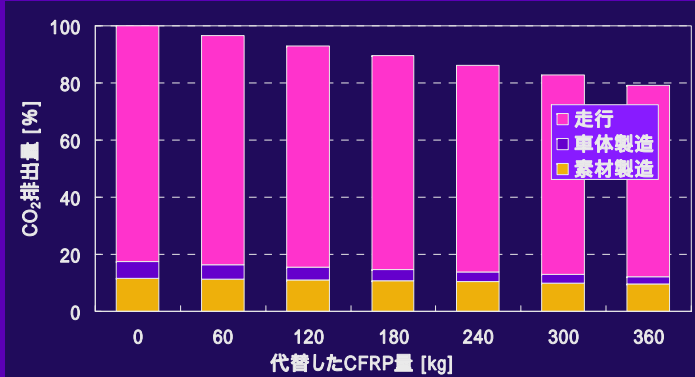
エネルギー消費量の変化 (素材製造段階, リサイクル材)



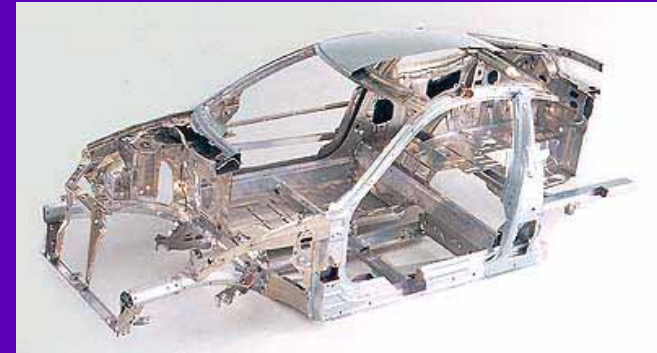
CO₂排出量の変化 (素材製造段階, リサイクル材)



CO₂排出量の変化 (リサイクル原単位: 3.3kg-CO₂/kg)



アルミニウム軽量車



ハイテン軽量車

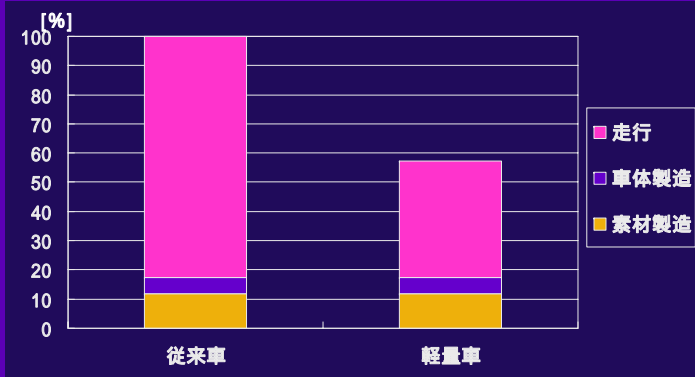


ULSAB-AVC車体の成果

	従来車	ハイテン車
燃費 (km/L)	11*	22.5
CO ₂ (g/km)	266	105
車両重量 (kg)	1147	933 (-19%)

*:別のモデル車のデータを参考

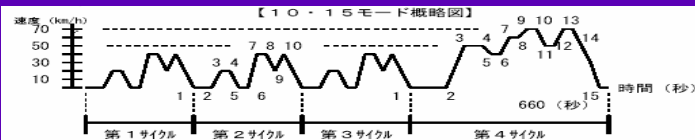
従来車とスチール製軽量車のエネルギー消費量の比較



資料: ULSAB-AVCプロジェクト

今後の研究課題

- パーツによって代替率や重量などが変わるので、さらに精度をあげたパラメータスタディを行う
- トラックなどの貨物部門を取り上げる
- CFRP車に適用したLCAを、車だけでなく他の分野にも広げ、新技術の環境影響の推定などを行う



図中番号	速度	時間(秒)	図中番号	速度	時間(秒)
1	アイドリング	2.0	1	アイドリング	6.6
2	加速 0 → 2.0 km/h	7	2	加速 0 → 5.0 km/h	1.8
3	一定速 2.0 km/h	1.5	3	一定速 5.0 km/h	1.2
4	減速 2.0 → 0 km/h	7	4	減速 5.0 → 4.0	4
5	アイドリング	1.6	5	一定速 4.0 km/h	4
6	加速 0 → 4.0 km/h	1.4	6	加速 4.0 → 6.0	1.6
7	一定速 4.0 km/h	1.5	7	一定速 6.0 km/h	1.0
8	減速 4.0 → 2.0	1.0	8	加速 6.0 → 7.0	1.1
9	一定速 2.0 km/h	2	9	一定速 7.0 km/h	1.0
10	加速 2.0 → 4.0	1.2	10	減速 7.0 → 5.0	1.0
	減速 4.0 → 2.0	1.0		アイドリング	1.0
	アイドリング	7			

【第1サイクル～第3サイクル】

(注) 10・15モード法:

日本の都市交通の走行実態を反映させたもので、シャシダイナモメータ上でこのモードに沿って自動車を走らせ、排出ガスを測定するもの。
10モードを3サイクルに15モード1サイクルを加えた4サイクルで測定。

【第4サイクル】