

運輸部門のエネルギー消費構造分析に基づく 材料関連省エネルギー技術の効果に関する研究

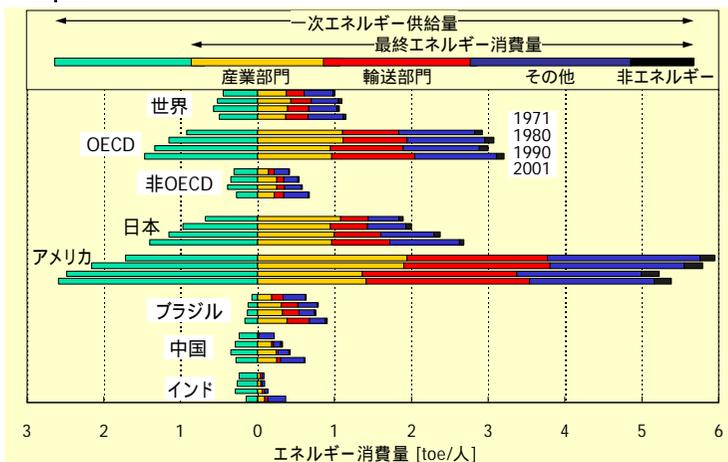
東京大学大学院 工学系研究科
環境海洋工学専攻 安全評価工学研究室

37070 鈴木徹也

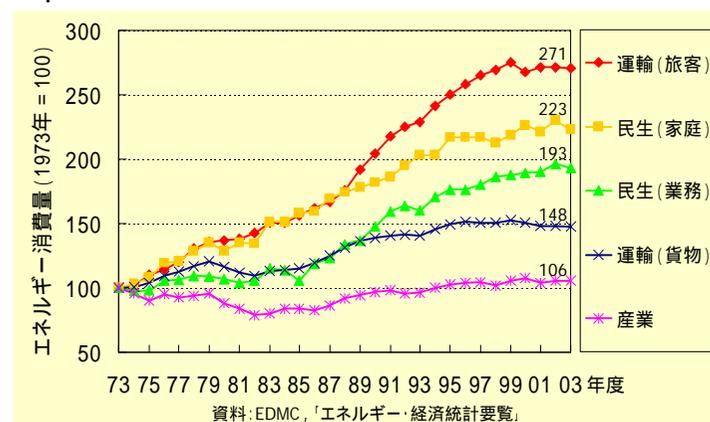
研究概要

- 運輸部門のエネルギー消費構造分析から、CFRPで自動車を軽量化し燃費を向上させることで、省エネするシナリオを設定した
- このシナリオを達成するために、CFRP車のLCAの基礎的な考え方を設定し、CFRPの自動車用途への展開の条件を明らかにした
- LCAを行うために、量産車用CFRPの原単位を見積もった
- リサイクルの考え方を導入した
- CFRPは素材製造時に大量のエネルギーを消費するが、ライフサイクルではエネルギー消費量を減らせることを証明し、スチールに対抗できることを定量的に明らかにした
- 商用車は多種多様なため、いくつかのサイズに分類してからLCAを行い、さらに運用形態による省エネ効果を検討した

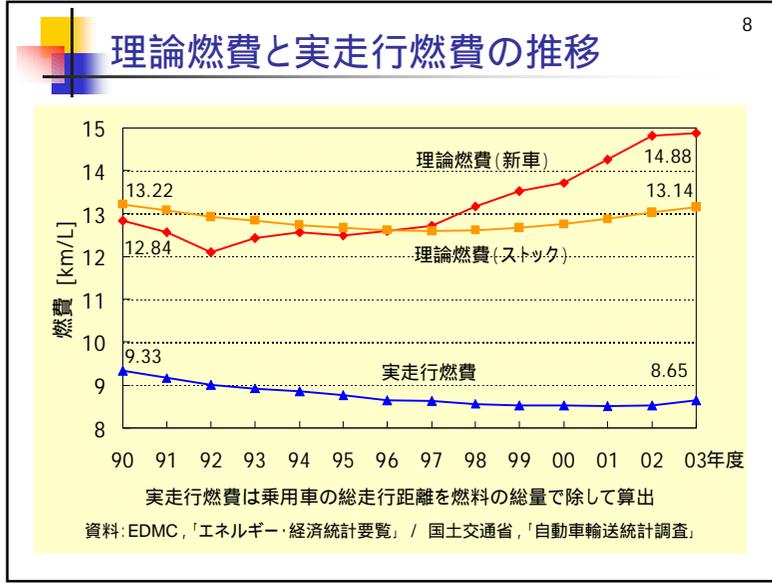
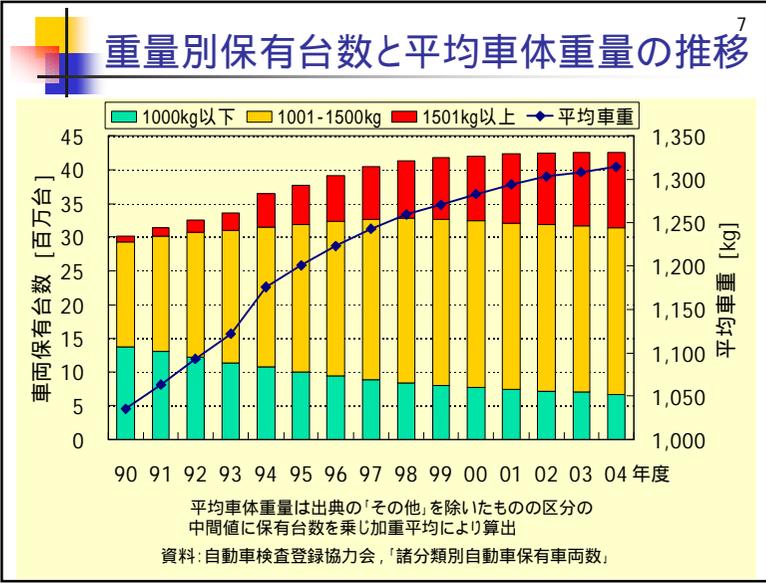
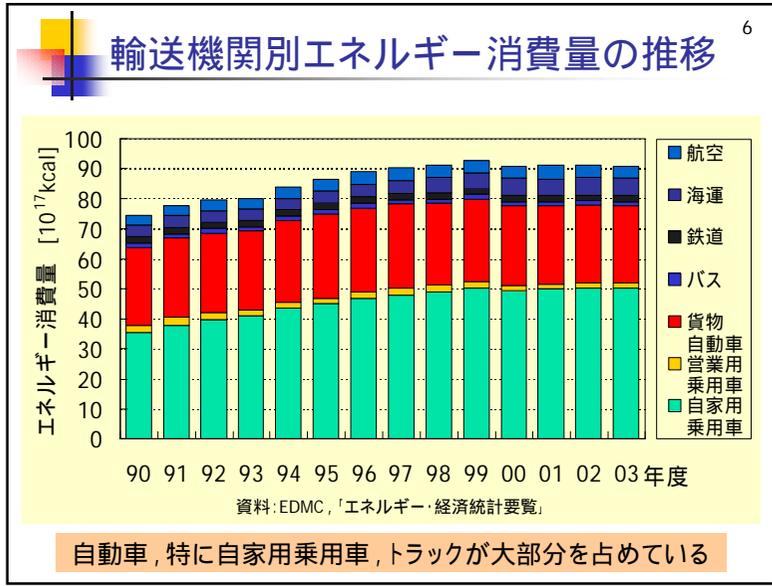
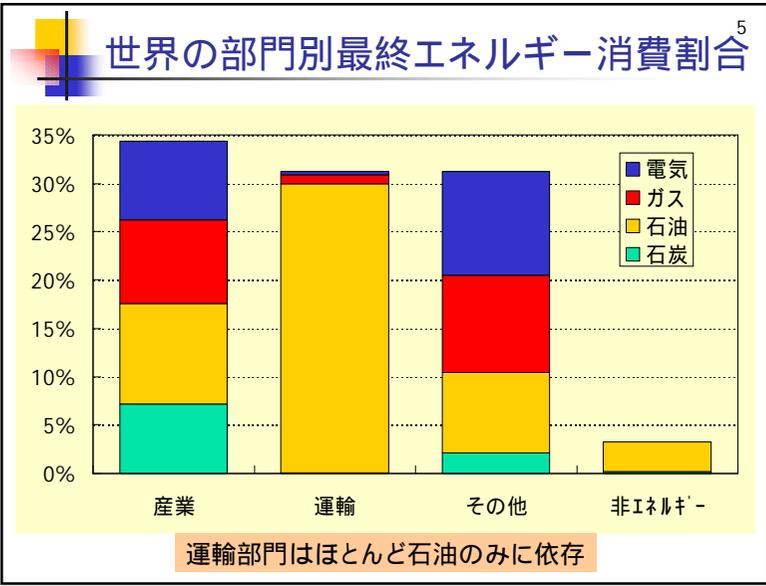
世界の部門別エネルギー消費量



日本の部門別最終エネルギー消費量の増加率



運輸部門での増加が著しい



運輸部門における省エネルギー量の見積もり

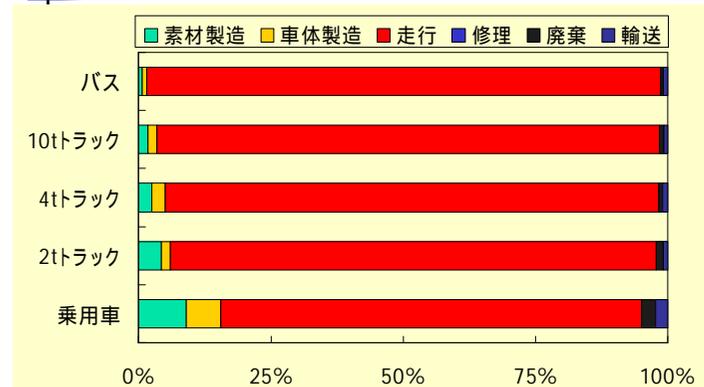
9

自動車燃費改善		540	単位: 万KL
単体対策 (840, 49%)	トプラナー基準適合車の加速的導入	100	
	クリーンエネルギー自動車の普及	80	
	バス・トラックのアイドリングストップ	40	
	大型トラックの走行速度の抑制	30	
	鉄道・航空のエネルギー効率向上	50	
	自動車交通需要調整	20	
交通流対策 (320, 20%)	高度道路交通システム(ITS)の推進	140	
	路上工事の縮減	10	
	交通安全施設の整備(信号機の高度化等)	20	
	テレワーク等情報通信を活用した交通代替の推進	130	
	内航・鉄道貨物輸送の推進	50	
モーダルシフト 対策 (540, 31%)	海運へのモーダルシフトの推進や輸送効率の向上	100	
	鉄道の利便性の向上	10	
	トラック輸送の効率化	110	
	国際貨物の陸上輸送距離の削減	70	
	公共交通機関の利用促進	200	
合計		1,700	

資料: 地球温暖化対策推進大綱, 2002

自動車のライフサイクルにおけるエネルギー消費量

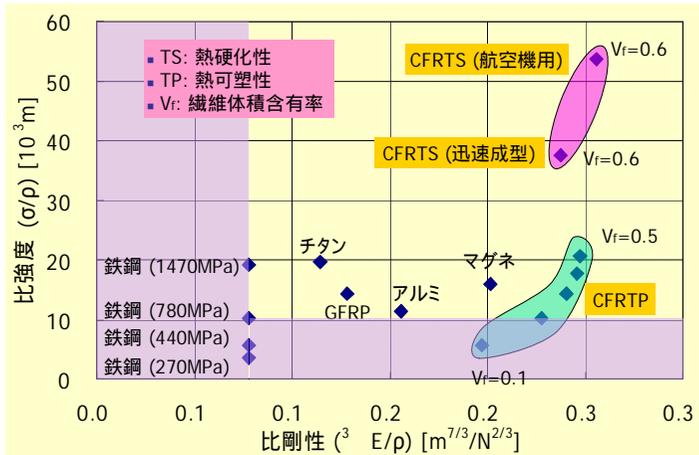
10



資料: J. Kasai, "Experiences and Thoughts About Life Cycle Assessment in the Automotive Industry in Japan", The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol.5, No.5, p.316 (2000)

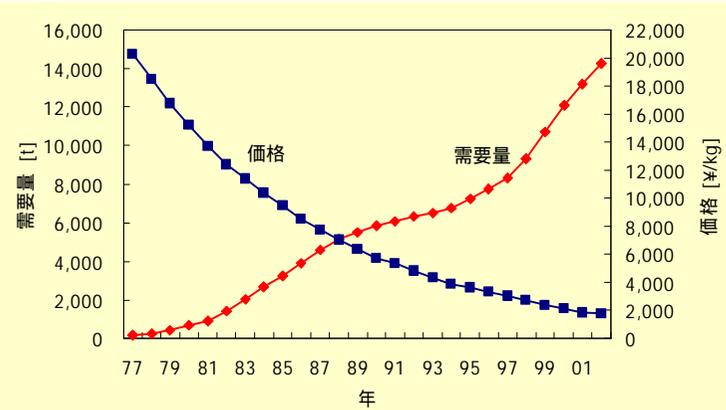
なぜCFRPか?

11



PAN系炭素繊維の需要量(世界)と価格の推移

12



資料: 菅健司, 炭素繊維協会第16回複合材料セミナー(2003)

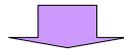
本研究の目的

13

- 燃費向上のための自動車樹脂化技術の開発が進み、超高級車ではCFRP軽量車が導入され始めているが、量産車への実用化はまだ困難

理由: 成型速度が遅い / 価格が高い / リサイクルが困難

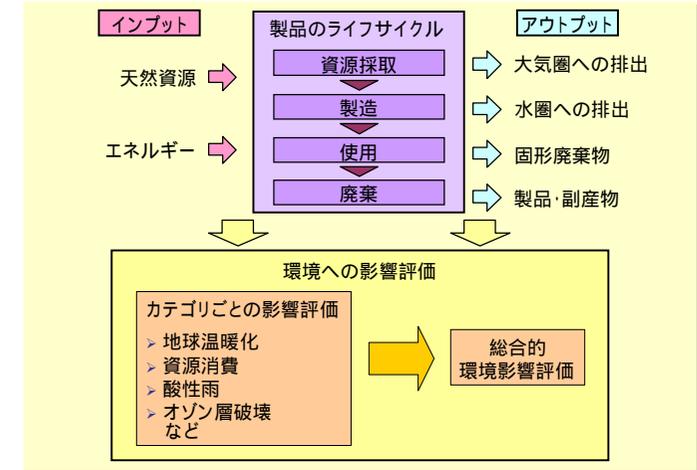
- しかしながら、大幅な燃費改善は必須であり、量産車の軽量化材料としてCFRPは大いに期待されている
- 炭素繊維の製造原単位は大きいので、軽量化による燃費向上効果のみを取り上げては、ライフサイクル全体の環境負荷低減効果を見積もることが出来ないため、LCAによる検証が必要である



- CFRPを用いて自動車を軽量化したときの環境負荷削減効果を評価し、今後の開発目標を示す
 - LCAを用いて従来車と比較することで、対スチール競争力を定量化
 - 材料・製法・リサイクル率のさらなる改善やトレードオフ解決の指針を検討し、設計へのフィードバックを目指す

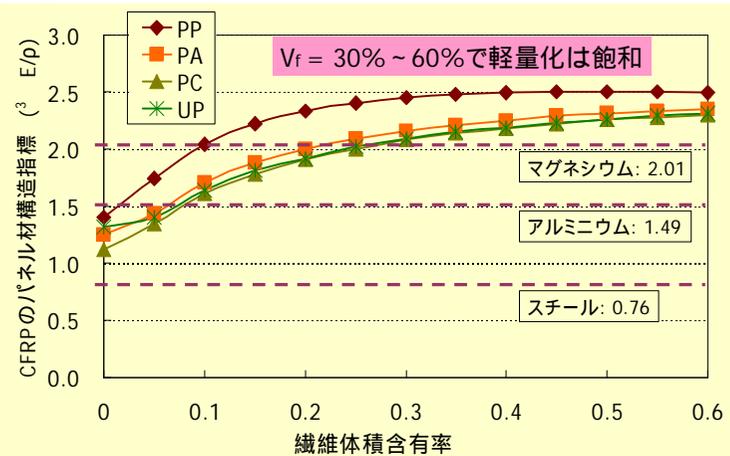
LCAとは？

14



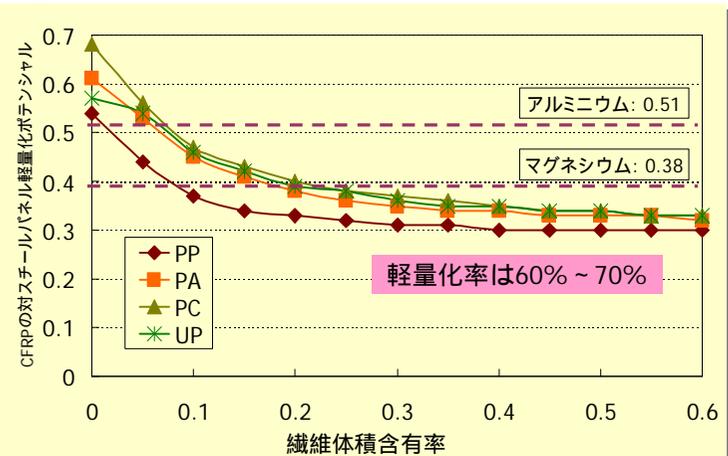
CFRPのパネル材構造指標

15

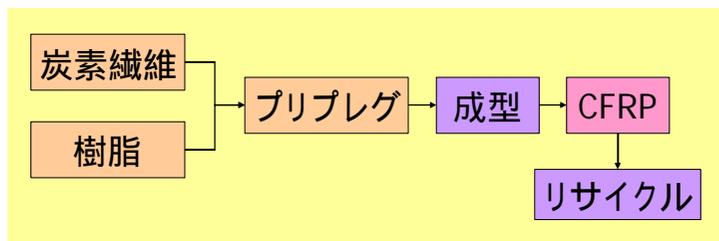


CFRPと鉄パネルの重量比

16



CFRPの製造原単位の算出プロセス¹⁷



鉄とPAN系炭素繊維のエネルギー原単位¹⁸

	スチール [MJ/kg]*1	炭素繊維 [MJ/kg]	
		1999年*2	2004年*3
原材料製造	-	42	39
加工組立	-	436	247
合計	33	478	286

資料1: 船崎敦, 種田克典, 「自動車LCAのためのインベントリ作成の考え方(3) - 鉄鋼製品の製造 - 」, 自動車研究第23巻第2号, 日本自動車研究所, 2001
 資料2: 日本航空宇宙工業会, 「複合材料のインベントリデータ構築に関する調査報告書」, 1997
 資料3: 地球温暖化防止新技術プログラム(NEDO), 「自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発」, H15年度成果報告書

炭素繊維の世界生産シェアの75%を有する我が国で, 1997年に初めて得られて2004年に見直された炭素繊維のインベントリデータの分析から, 量産車用に合理化されたCFRP原単位の推定を行った

マトリックス樹脂の原単位¹⁹

樹脂	エネルギー原単位 [MJ/kg]	
エポキシ	76.0	CFRTS
不飽和ポリエステル	62.8	
フェノール	32.9	
軟質ポリウレタン	67.3	
高密度ポリエチレン	20.3	
ポリプロピレン	24.4	CFRTP

プリプレグ製造省略による原単位の低下²⁰

製造工程	エネルギー原単位 [MJ/kg]
樹脂混合	0.1
樹脂コーティング	1.4
樹脂含浸	2.1
プリプレグ巻取	0.2
作業場の雰囲気管理	20.8
冷凍庫保管(原料)	11.5
冷凍庫保管(プリプレグ)	3.4
剥離紙製造	0.5
合計	40.0

- プリプレグ製造の省略
- CF製造からCFRP部品成型までの量産ラインの構築

エネルギー消費量の大幅な低下

0-4 MJ/kg

成型の原単位

21

成型法	エネルギー消費量 [MJ/kg]
ハンドレイアップ	19.2
スプレイアップ	14.9
RTM	12.8
VARI	10.2
コールドプレス	11.8
プリフォームマッチドダイ	10.1
SMC	3.5
フィラメントワインディング	2.7
ブルトリュージョン	3.1

CFRTS

CFRTP

ボディ用CFRPの原単位

22

- 剛性が重視される
- 炭素繊維体積含有率: 30%
- マトリックス樹脂: ポリプロピレン 熱可塑性
- 比剛性ベースで対鉄鋼比70%の軽量化率

	原単位 [MJ/kg]	重量 [kg]	エネルギー [MJ/kg-CFRP]
CF	286	0.462	132
PP	24	0.538	13
プリフォームマッチドダイ法	10	1	10
CFRTP	155	1	155

シャーシ用CFRPの原単位

23

- 強度が重視される
- 炭素繊維体積含有率: 60%
- マトリックス樹脂: エポキシ 熱硬化性
- 比強度ベースで対鉄鋼比70%の軽量化率

	原単位 [MJ/kg]	重量 [kg]	エネルギー [MJ/kg-CFRP]
CF	286	0.692	198
EP	76	0.308	23
RTM法	13	1	13
CFRTS	234	1	234

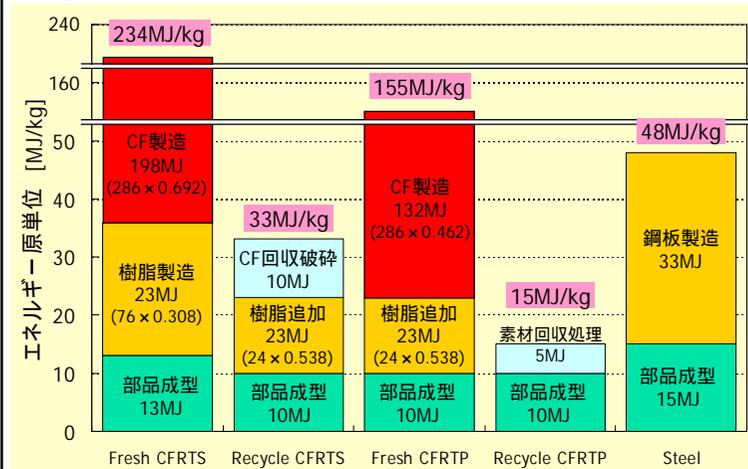
CFRPのリサイクル原単位

24

- CFRTSのリサイクル
 - 繊維体積含有率: 30%
 - 追加のフレッシュPP: 13MJ/kg
 - プリフォームマッチドダイ: 10MJ/kg
 - CFの分離・回収: 10MJ/kg
 - 合計: 43MJ/kg
- CFRTPのリサイクル
 - フレッシュ樹脂の追加なしで溶融再成型
 - プリフォームマッチドダイ: 10MJ/kg
 - CFRTPの回収: 5MJ/kg
 - 合計: 15MJ/kg

量産車用CFRP部材の原単位

25



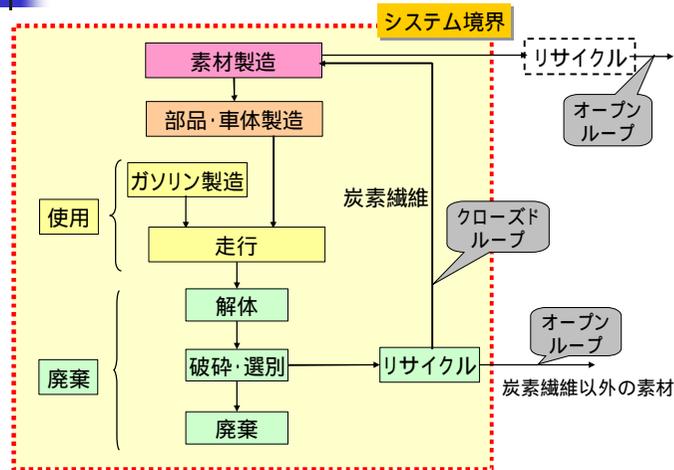
LCAの目的および調査範囲の設定 (乗用車)

26

- 実施目的
 - CFRP製乗用車と従来のスチール製乗用車の環境負荷を比較する
 - 用いるCFRPのタイプにより3つのシナリオを設定し、リサイクル材の環境面での優位性を検討する
- 評価対象製品
 - セダン型2000ccの平均的乗用車
- 機能単位及び基準フロー
 - 機能単位は使用年数が10.00年で生涯走行距離が97,376kmの乗用車。基準フローは機能単位を満たす乗用車1台
- システム境界
 - 素材製造, 車体製造, 走行, リサイクル・廃棄
- 環境負荷項目
 - エネルギー消費量
- 原単位
 - 後述

乗用車のライフサイクルフロー

27



対象車の諸元

28

項目	仕様
車重 [kg]	1,380
排気量 [cc]	2,000
燃料の種類	ガソリン
ボディタイプ	4ドア・セダン
駆動方式	FF
トランスミッション	AT

部位別重量構成

29

部位	合計 [kg]	鉄 [kg]	非鉄金属 [kg]	その他 [kg]
ボディ	475.0	453.4	6.6	15.0
シャーシ	239.3	197.8	2.8	38.8
内外装品	223.5	66.6	0.0	156.9
エンジン	194.4	142.1	40.4	11.9
その他	247.7	98.9	70.9	77.9
合計	1380.0	958.8	120.7	300.5

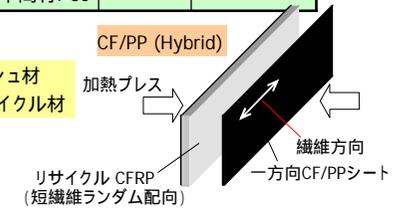
- ボディ, シャーシ, 内外装品のスチールをCFRPに置き換えた
- エンジンは副次的に20%軽量化するとした

鉄とCFRPの各種データ

30

	エネルギー 原単位 [MJ/kg]	繊維体積 含有率 [%]	軽量化率 [%]	マトリックスの タイプ
スチール	33	-	-	-
CF/EP (Fresh)	234	60	70	熱硬化 (TS)
CF/PP (Fresh)	155	30	65	熱可塑 (TP)
CF/PP (Recycle)	33	30	50	熱可塑 (TP)
CF/PP (Hybrid)	61	シート: 40 中間材: 30	60	熱可塑 (TP)

- CF/EP (Fresh), CF/PP (Fresh) : フレッシュ材
- CF/PP (Recycle), CF/PP (Hybrid) : リサイクル材



CFRP適用のシナリオ

31

- ケース(1): CF/EPのみ
 - CF/EP は高性能だが環境に悪い
- ケース(2): CF/EP, CF/PP
 - CF/PPはCF/EPより安価で環境に良い
- ケース(3): CF/EP, CF/PP, CF/PP (Hybrid), CF/PP (Recycle)
 - リサイクルCF/PPはさらに環境に良い

	従来車	CFRP車		
		ケース(1)	ケース(2)	ケース(3)
ボディ	スチール	CF/EP	CF/PP	CF/PP (Hybrid)
シャーシ	スチール	CF/EP	CF/EP	CF/EP
内外装品	スチール	CF/EP	CF/PP	CF/PP (Recycle)
車両重量 [kg]	1,380	792	818	850
軽量化率 [%]	-	37	37	35

車体製造段階

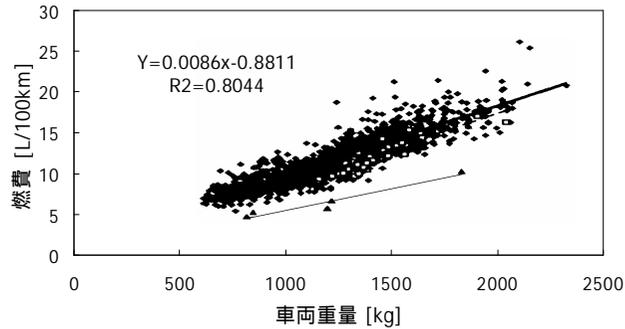
32

- 素材を製造した段階で,すでに最終形状に近い形になるので,加工・組立工程が金属の場合より少ない
- 一体成型により部品点数が減少
- CFRPは錆びないので塗装回数が減少

比例換算によりエネルギー消費量減少

走行段階

33



資料: 工藤祐揮ら, 「ガソリン乗用車の実燃費マクロ推計式の構築」, 土木学会論文集No. 793 / -68(2005.7)

- 総走行距離: 9,737.6[km/年] × 10.00[年]=97,376[km]
- ガソリン製造原単位: 5,067[kJ/L]
- ガソリン発熱量: 34.61MJ/L

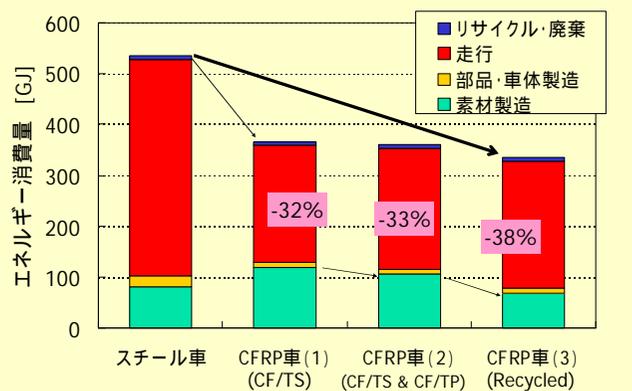
リサイクル・廃棄段階

34

- 自動車の大部分の部品はリサイクルされるが、そのほとんどが自動車以外の産業で使われるため、リサイクル時のエネルギー回収はゼロとした
- リサイクル原単位
 - 従来車の素材: 5.5 MJ/kg
 - 回収CF: 15 MJ/kg (熱処理)
- 輸送原単位: 0.390 MJ/kg
- 廃棄原単位: 0.003 MJ/kg
- CFRP車において、回収した炭素繊維のうち乗用車用のCFRPリサイクル材に用いられる分の回収エネルギーは、素材製造段階に配分した

乗用車のライフサイクルでのエネルギー消費量

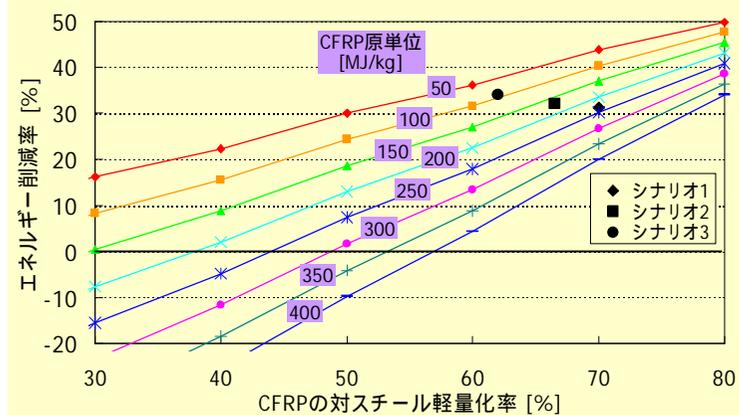
35



CFの製造原単位を精度良く取得して、リサイクルを考慮したCFRPのライフサイクル環境負荷計算を実施し、対スチール競争力を定量化した

CFRPの対スチール軽量化率とエネルギー削減率の関係

36



乗用車軽量化のまとめ

37

- フレッシュのCFRPのみで乗用車を軽くしたときは、CFRPの原単位が大きいいため、素材製造時のエネルギー消費量は増えたが、走行時の減少が大きく効いてくるので、ライフサイクルでのエネルギー消費量は約31%減少した
- リサイクル材を用いたときは軽量化率がフレッシュの場合より鈍るが、原単位の大幅な低下によりエネルギー消費量削減率は約35%に向上した
- 部材ごとに求められる力学特性と、適用すべきCFRPの性能を効果的に組み合わせることが重要

CFRPを商用車に適用するメリット

38

商用車の特徴

- 多品種少量生産
- 長い総走行距離
- 長い平均使用年数
- ストップ&ゴーの繰り返し (バス)

CFRPの利点

- 腐食に強い
- 設計の自由度が高い
- 設備投資の安さ
- 軽量化による燃費改善
- 低床化による剛性低下を補える

LCAの目的および調査範囲の設定(トラック)

39

- 実施目的
 - 大型・中型・小型それぞれにおいて、従来のスチールトラックとCFRP軽量トラックのライフサイクルでの環境負荷を比較し、CFRPによる軽量化について環境面での優位性を検討する
- 評価対象製品
 - 大型、中型、小型トラック
- 機能単位及び基準フロー
 - 機能単位は後述、基準フローは機能単位を満たすトラック1台
- システム境界
 - 素材製造、車体製造、走行
- 環境負荷項目
 - エネルギー消費量
- 原単位
 - スチール: 33MJ/kg, CFRP: 234MJ/kg

トラックの基礎データ

40

	車両重量 [t]	最大積載量 [t]	積載率 [%]	車両総重量 [t]	総走行距離 [10 ⁴ km]	使用年数 [年]
大型	8	10	50	13	120	13
中型	4	4	50	6	40	11
小型	2.4	2	10	2.6	25	11

大型トラックの部位別重量

41

部位	合計	鉄鋼	非鉄金属	その他	軽量化
エンジン	1329.9	990.9	284.1	54.9	20%軽量化
トランスミッション	1466.8	1386.9	78.2	1.7	10%軽量化
フレーム	1724.6	1708.4	0.0	16.1	鉄100 CFRP50
ステアリング, ブレーキ, サスペンション	1105.1	77.6	0.1	307.4	鉄100 CFRP50
艀装品	450.8	169.2	6.1	275.5	軽量化ゼロ
キャブ	621.7	569.4	7.0	45.4	鉄100 CFRP50
ボディ	1077.4	706.9	1.3	369.2	鉄100 CFRP50
電装品, 液類	223.7	28.4	83.6	111.7	軽量化ゼロ
合計 [kg]	8000.0	6357.7	460.4	1181.9	-

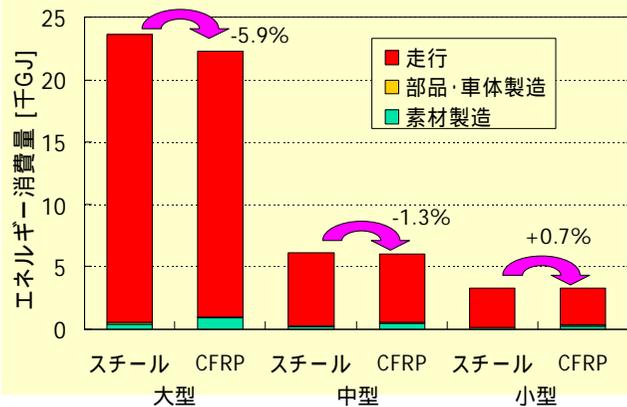
各トラックの軽量化率

42

	スチール車 [kg]	CFRP車 [kg]	軽量化率 [%]
大型	8,000	5,696	28.8
中型	4,000	2,848	28.8
小型	2,400	1,709	28.8

トラックのライフサイクルでのエネルギー消費量

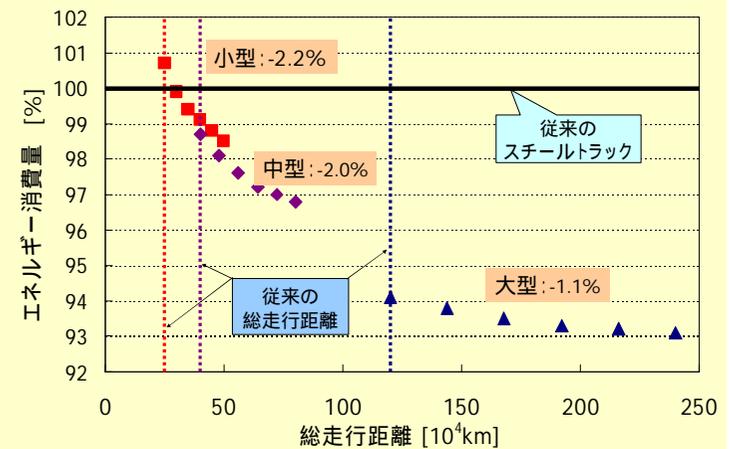
43



積載物のため, 車体の軽量化効果が小さい

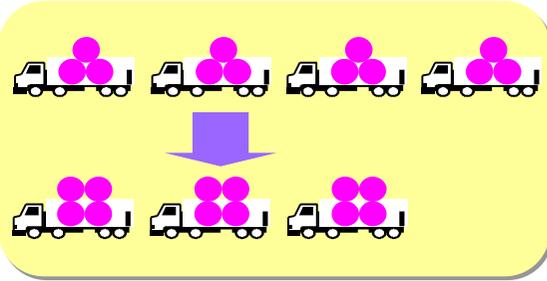
総走行距離を変化させた場合

44



積載量を変化させた場合

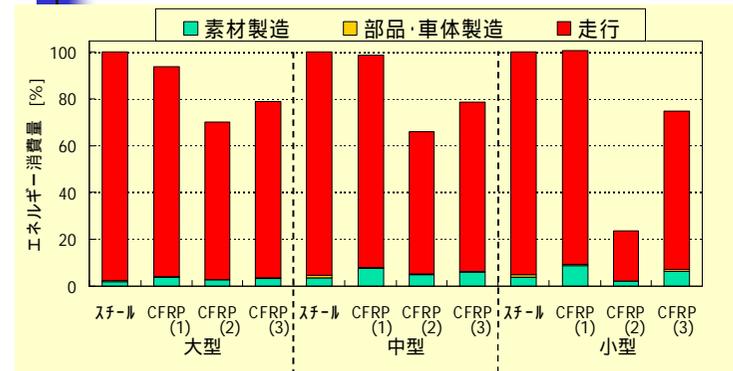
45



総輸送トンキロ数を一定として、1台あたりの積載量の増加に伴い車両の保有台数が減少するものとした

積載量を変化させた場合

46



- CFRP(1): 軽量化後の積載量が変わらない
- CFRP(2): 軽量化した重量と同じだけ積載量が増える
- CFRP(3): 軽量化した重量に現状の積載率をかけた分だけ積載量が増える

トラック軽量化のまとめ

47

- 貨物に乗せるため、車体を軽くしても車両全体の軽量化が鈍り、乗用車ほどの省エネ効果はなかった
- 総走行距離を伸ばすと燃費の向上がより効いてくるが、距離を2倍にしても数%の削減効果向上にとどまった
- 軽量化による積載量の増加に伴いトラックの台数が減るとし、積載率は従来と変わらないとすると、削減率は25%~30%程度となった

LCAの目的および調査範囲の設定(バス)

48

- 実施目的
 - CFRP製バスと従来の鉄製バスの環境負荷を比較する
- 評価対象製品
 - CFRPバスと従来バス大型、中型、小型、マイクロ
- 機能単位及び基準フロー
 - 大型・中型バスの機能単位は、乗車率30%で585,000km走行すること、小型・マイクロバスの機能単位は、乗車率30%で465,000km走行すること。基準フローは機能単位を満たすトラック1台
- システム境界
 - 素材製造、車体製造、走行
- 環境負荷項目
 - エネルギー消費量
- 原単位
 - スチール: 33MJ/kg, CFRP: 234MJ/kg

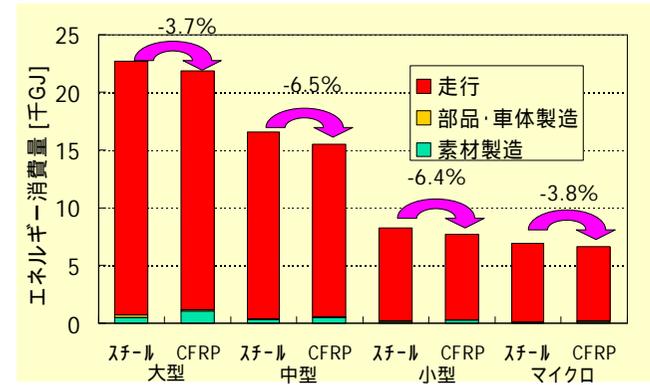
各バスの軽量化率

49

サイズ	素材	構造部材重量 [kg]	車両重量 [kg]	軽量化率 [%]
大型	スチール	2,719	9,980	-
	CFRP	1,760	9,021	-9.6
中型	スチール	1,459	6,371	-
	CFRP	599	5,511	-13.5
小型	スチール	1,072	2,700	-
	CFRP	493	2,121	-21.4
マイクロ	スチール	609	1,630	-
	CFRP	306	1,327	-18.6

バスのライフサイクルでのエネルギー消費量

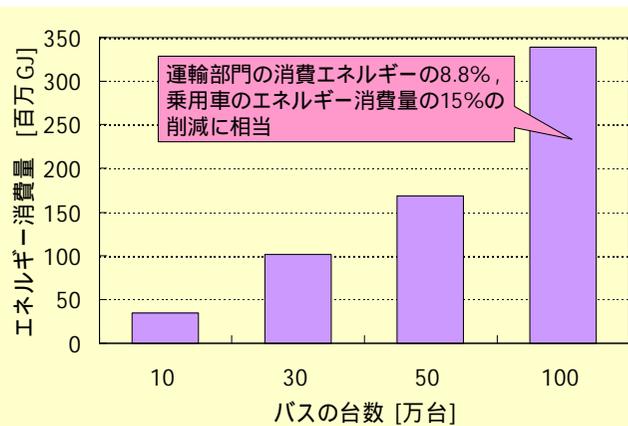
50



乗客を乗せるため、車体の軽量化効果が小さい

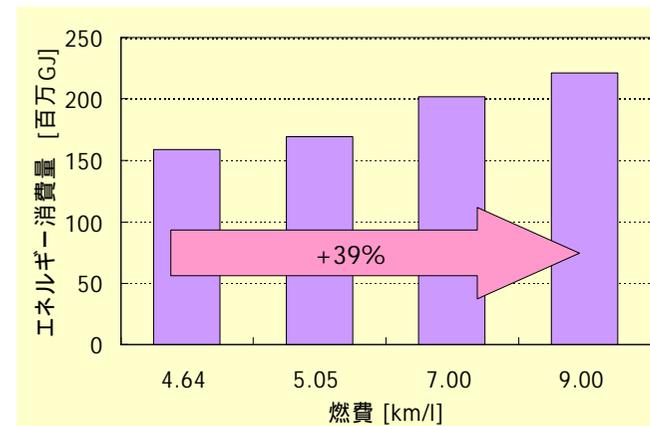
通勤バス普及による省エネルギー効果

51



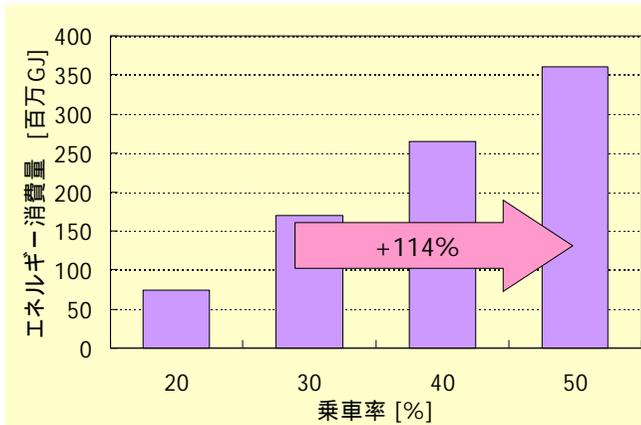
燃費の向上による省エネルギー効果

52



乗車率が省エネルギー効果に与える影響

53



普及台数: 50万台, 燃費: 5.05km/L

バスの軽量化のまとめ

54

- 乗客を乗せるため、車体を軽くしても車両全体の軽量化が鈍り、乗用車ほどの省エネ効果はなかった
- 普及台数や乗車率の増加は省エネ効果に大きく寄与した
- この2つに比べると燃費向上による省エネ効果は目立たないが、人口密度が低く高い乗車率が見込まれない地域では、燃費向上技術は重要である

本研究で得られた知見

55

- 量産車用CFRPの基礎的なインベントリデータベースを構築した
- 量産車用CFRP部材の製造原単位をスチール並みに引き下げるには、生産の合理化や、迅速成型、3Rなどの技術を効果的に組み合わせる必要がある
- LCAの精度が向上し、リサイクルも含めた議論ができる下地を作った
- 従来無理と思われてきたCFRP車の環境影響評価を行えたことで、CFRP車の可能性が格段に広まった
- CFRPによる乗用車の軽量化は、省エネ効果に大きく寄与した。CFRPのリサイクル材を使うとより効果的である
- トラックの軽量化による省エネ効果には、積載量の増加によって保有台数が減少するような物流の効率化が大きく寄与する
- バスの軽量化による省エネ効果には、乗車率や普及台数の増加が大きく寄与する

CFRPによる省エネ技術は運輸部門の省エネルギーに大きく寄与する