

基本の数式

勾配抵抗[N] = 質量[kg] × 重力加速度[m/s²] × sin Θ

転がり抵抗[N] = 質量[kg] × 重力加速度[m/s²] × 転がり抵抗係数
空気抵抗[N] = 1/2 × 大気密度[kg/m³] × 空気抵抗係数 (CD値)
× 前面投影面積 × 速度[m/s]²

力×速度 = 出力 FV = Pow

T (Nm) = 駆動力 F (N) × タイヤ半径 (m) / ギヤ比

モータ回転数rpm = クルマ速度 (m/s) / タイヤ周長(m) × 60 × ギヤ比

F=ma ⇔ F=J dω/dt J; 回転イナーシャ

P=FV ⇔ P=ωT

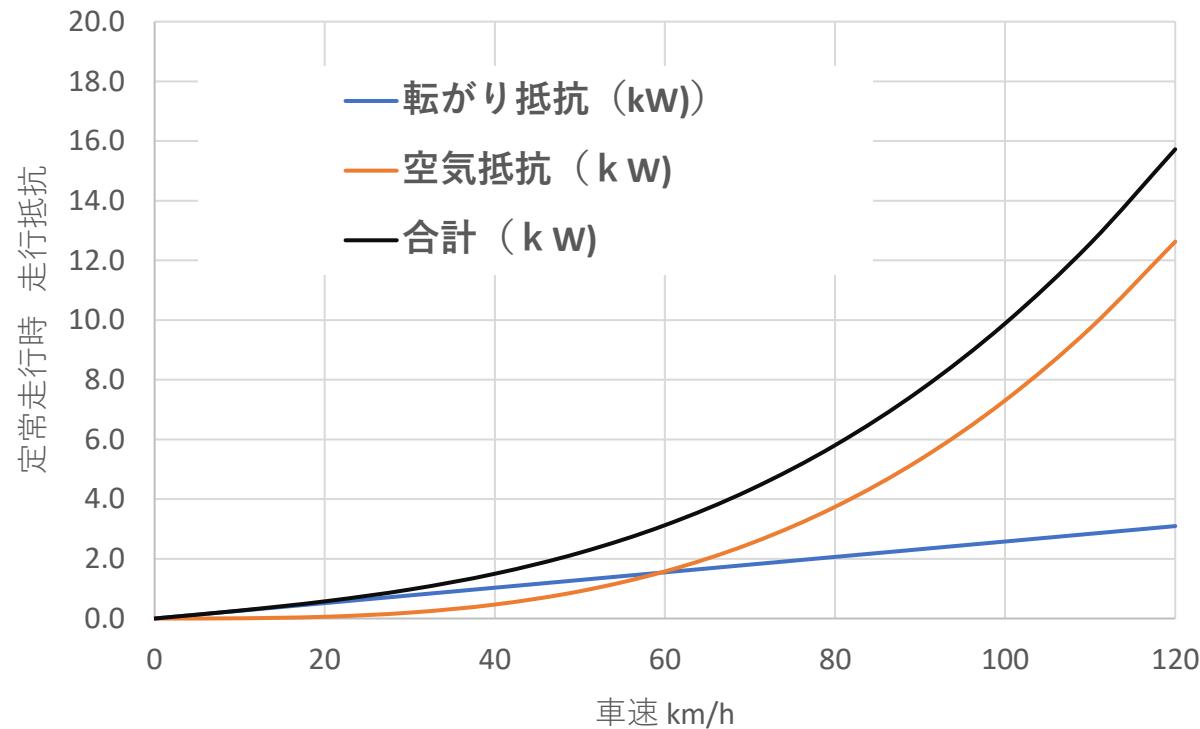
走行電力 = 走行抵抗損失/システム効率 + 暖房

持続時間 (h) = (電池容量(kWh)/設定速度走行電力 (kW)

走行距離 = 持続時間(h) × 每時速度(km/h)

街を走るには、転がり抵抗を減らしたいけど？

転がり抵抗[N] = 質量[kg] × 重力加速度[m/s²] × **転がり抵抗係数**



タイヤの技術

転がり抵抗[N] = 質量[kg] × 重力加速度[m/s²] × **転がり抵抗係数**

<https://tire.bridgestone.co.jp/about/knowledge/teinenpi/>

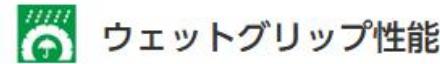


転がり抵抗：

走行中にタイヤが損失してしまうエネルギー

転がり抵抗係数：

タイヤの荷重に対する転がり抵抗の比率



路面が濡れた状態でのタイヤのグリップ力（制動時のグリップ力など）

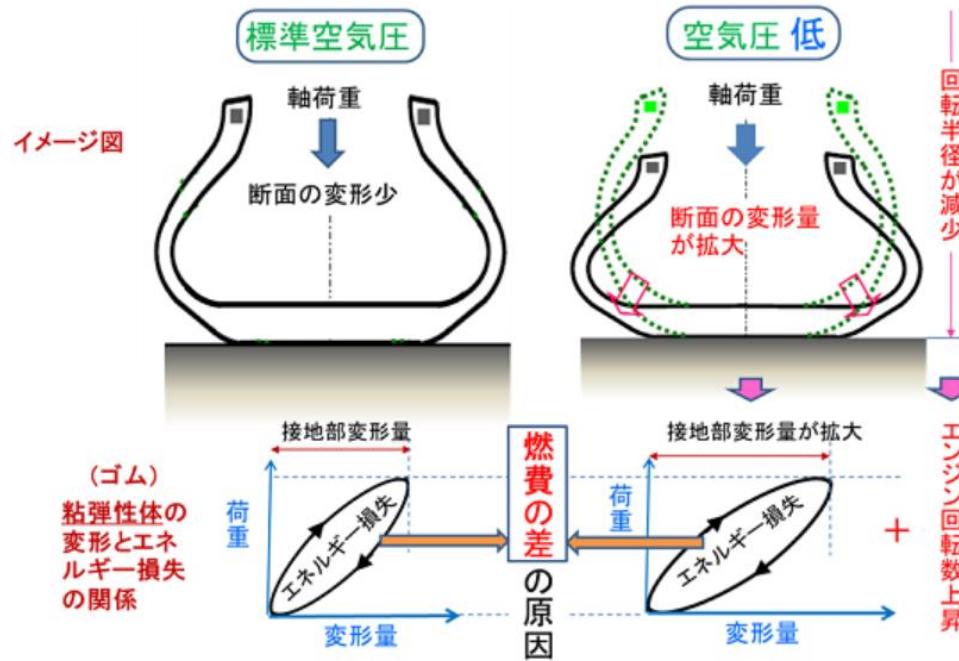
等級	単位(N/kN)	転がり抵抗係数(RRC)
AAA		RRC≤6.5
AA		6.6≤RRC≤7.7
A		7.8≤RRC≤9.0
B		9.1≤RRC≤10.5
C		10.6≤RRC≤12.0

↑
低燃費
↓
低燃費以外

等級	単位(%)	ウェットグリップ性能(G)
a		155≤G
b		140≤G≤154
c		125≤G≤139
d		110≤G≤124

タイヤの技術

タイヤの損失は変形繰り返しによるロス

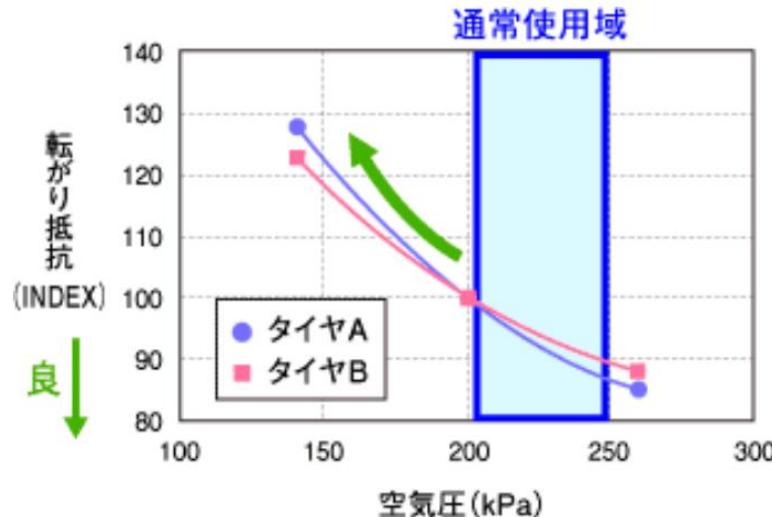


左の図は、タイヤの変形状態を強調して描いたイメージ図です。

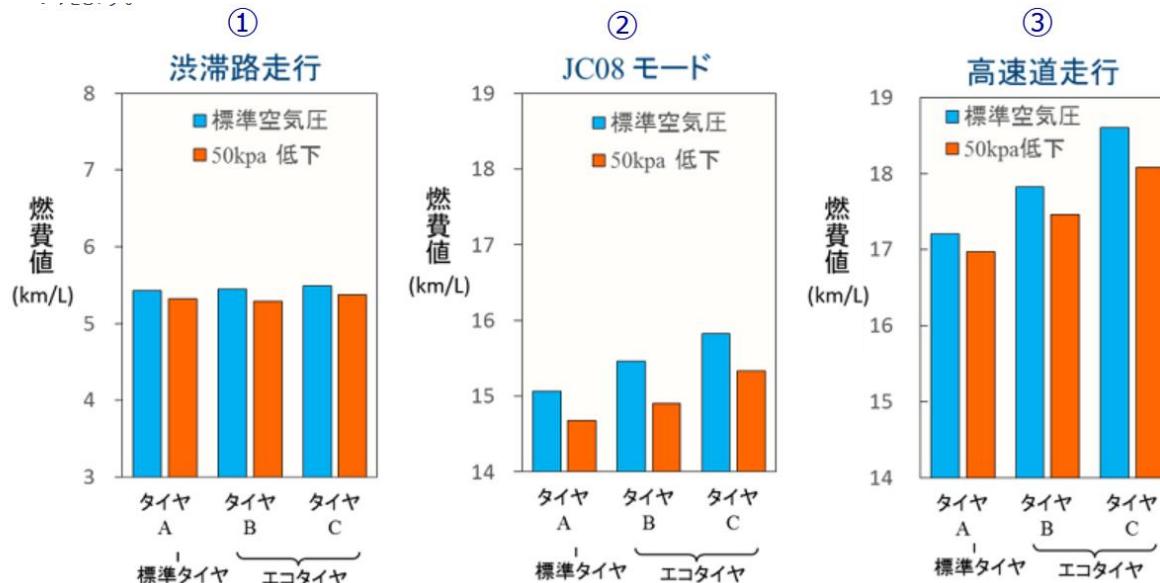


材料の微細構造を制御した
「ナノプロ・テック™」により
トレッドゴムのエネルギーロスを
低減し、発熱を抑制。
転がり抵抗の低減を図った。

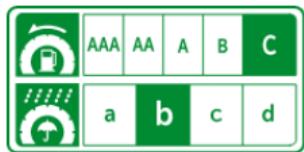
空気圧点検は大事です



<https://www.jatma.or.jp/labeling/faq02.html>



タイヤの技術（タイヤ交換の時はここをみましょう！）



転がり抵抗係数：C、
ウェットグリップ性能：b
31サイズ



転がり抵抗係数：AAA、
ウェットグリップ性能：a
2サイズ

		交換後 タイヤの転がり抵抗性能				
		AAA	AA	A	B	C
交換前 タイヤの転がり抵抗性能	AAA	△	△1%	△2%	△3%	△4%
	AA	1%改善	△	△1%	△2%	△3%
	A	2%改善	1%改善	△	△1%	△2%
	B	3%改善	2%改善	1%改善	△	△1%
	C	4%改善	3%改善	2%改善	1%改善	△

● ガソリン1リットルあたりの燃費改善額

165円/リットルの場合

	改善金額
4%改善	6.6円
3%改善	5.0円
2%改善	3.3円
1%改善	1.7円

「年間では何円お得か？」を計算すると、

	改善金額
4%改善	7,920円
3%改善	6,000円
2%改善	3,960円
1%改善	2,040円

※[試算条件]月平均:1,000km、年間:12,000km、
平均燃費10km/リットルで計算

転がり抵抗係数でみる鉄道のすばらしさ！

- 鉄の車輪は変形しないので、転がり抵抗ロスが極めて少ない

転がり抵抗係数

車輪／路面の種類	転がり抵抗係数 C_{rr} (10^{-3})
鉄道車輪／レール	0.2 - 1
自転車用タイヤ (内圧約8気圧、 50km/h)	2.2 - 5
ソーラーカー・エコマラソン用特製タイヤ	2.5
BMXタイヤ	5.5
自動車用タイヤ／SAE J1269で計測	6.2 - 15
自動車用タイヤ／コンクリート舗装路	10 - 15
自動車用タイヤ／砂地	300

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%BB%A2%E3%81%8C%E3%82%8A%E6%8A%B5%E6%8A%97>

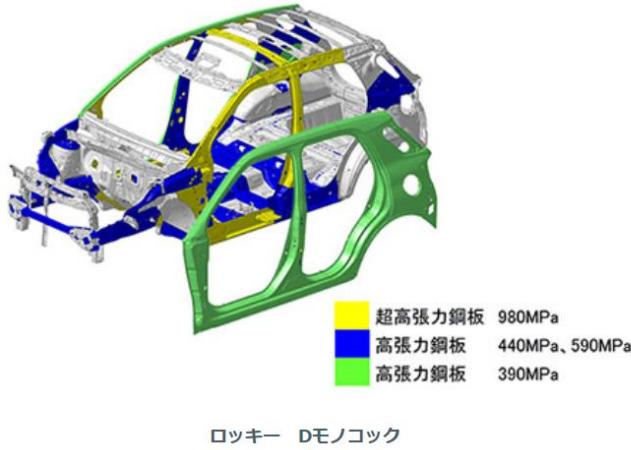
転がり抵抗のもうひとつの鍵は軽量化

転がり抵抗[N] = 質量[kg] × 重力加速度[m/s²] × 転がり抵抗係数

材料			密度	ヤング率	比弾性率	引張強度	比強度 (引張強度/比重)	線膨張係数
			(g/cm ³)	(GPa)	-106	(MPa)	kN·m/kg	(10-6/°C)
GFRP	Eガラス	一方向 (繊維体積含有率 vf:60%)	1.9	35	1.9	900	0.47	8
		ガラエポG-10	1.9	20	1.1	300	0.16	11
CFRP	PAN 230GPa	3Kクロス材 (樹脂重量含有率 RC:44%)	1.47	60	4.2	650	0.44	3
	PAN 230GPa	一方向 (樹脂重量含有率 RC:34%)	1.55	130	8.6	2400	1.55	0.4
ステンレス	SUS304		7.9	200	2.6	590	0.07	18
炭素鋼	S45C		7.8	210	2.7	570	0.07	12
	スーパーハイテン		7.8			1200	0.15	
アルミニウム	A5052	アルミ材	2.7	71	2.7	260	0.10	24
	A7075	超々ジュラル ミン	2.8	72	2.7	570	0.20	24
チタン合金	6Al-4V	α - β型	4.4	113	2.6	960	0.22	8.8

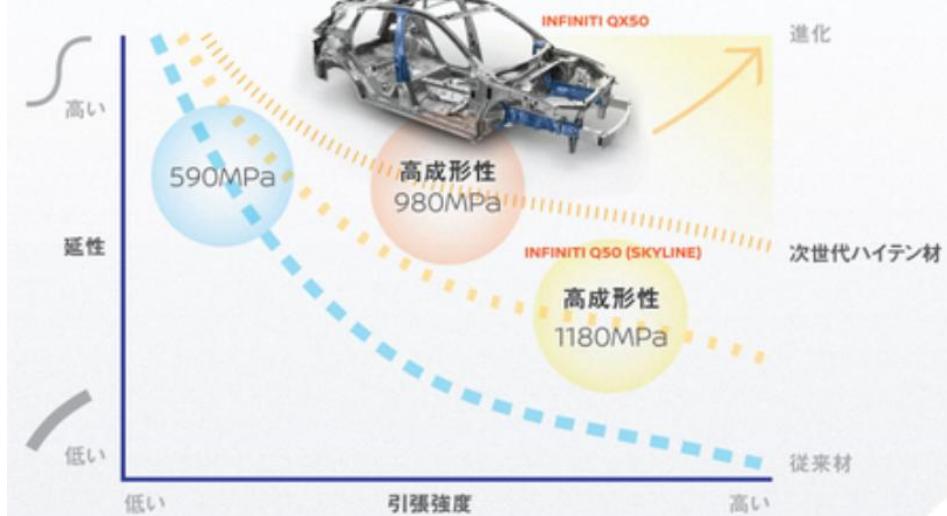
軽量化の技術（高張力鋼板、ハイテン材）

強度が2～3倍高い鉄はあるけど、加工が大変



https://www.daihatsu.com/jp/car_information/vehicle.htm

日産世界初使用 高成形性980MPa級超ハイテン材



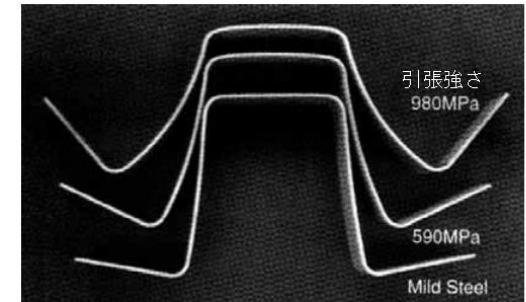
<https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/180618-01-j?source=nng&lang=ja-JP>

高張力鋼板のハット曲げにおけるスプリングバック



冷間プレス

- ・プレス機で高強度材のまま成形
- ・伸びにくく成形難しい、高い技術力が必要
- ・生産性が高く、電力使用量が少ない



岩谷：プレス技術, 42-8(2004), 43

<https://plast.me.tut.ac.jp/present/hotstamping2.pdf>



Der neue Audi A8

Audi Space Frame in Multimaterialbauweise

The new Audi A8

Multimaterial Audi space frame

04/17



- Aluminium-Blech
Aluminum sheet
- Aluminium-Profil
Aluminum section
- Aluminium-Guss
Aluminum castings

- Ultrahochfester Stahl (warmumgeformt)
Ultra-high strength steel (hot-formed)
- Konventioneller Stahl
Conventional steel
- Magnesium
- Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK)
Carbon fiber-reinforced plastic (CFRP)

ギガキャスト（テスラが始めた画期的な工法革命）

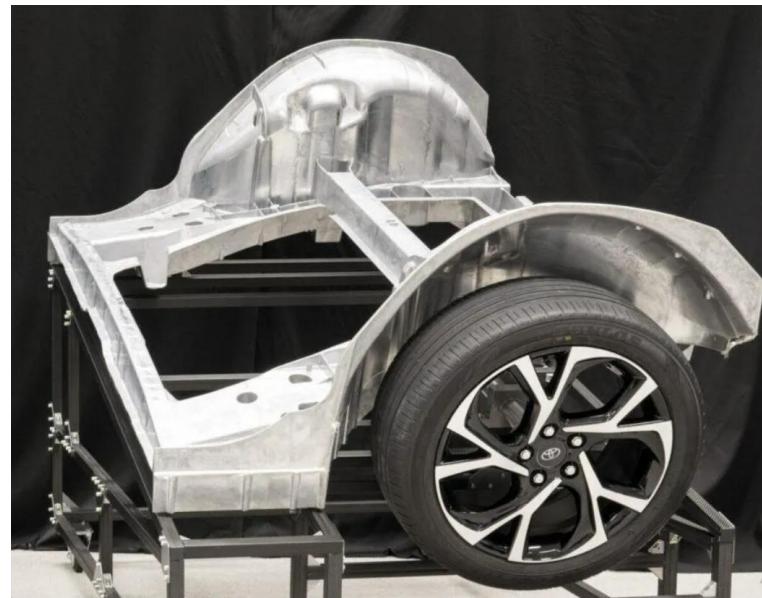


- ・部品すり合わせ不要

- ・機械加工で高精度ボディー

- ・設備無し

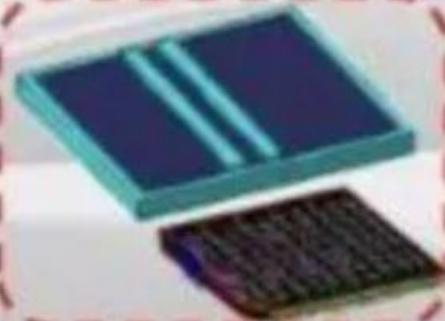
- ・下から上へ
シンプルに組付



Fr



Center



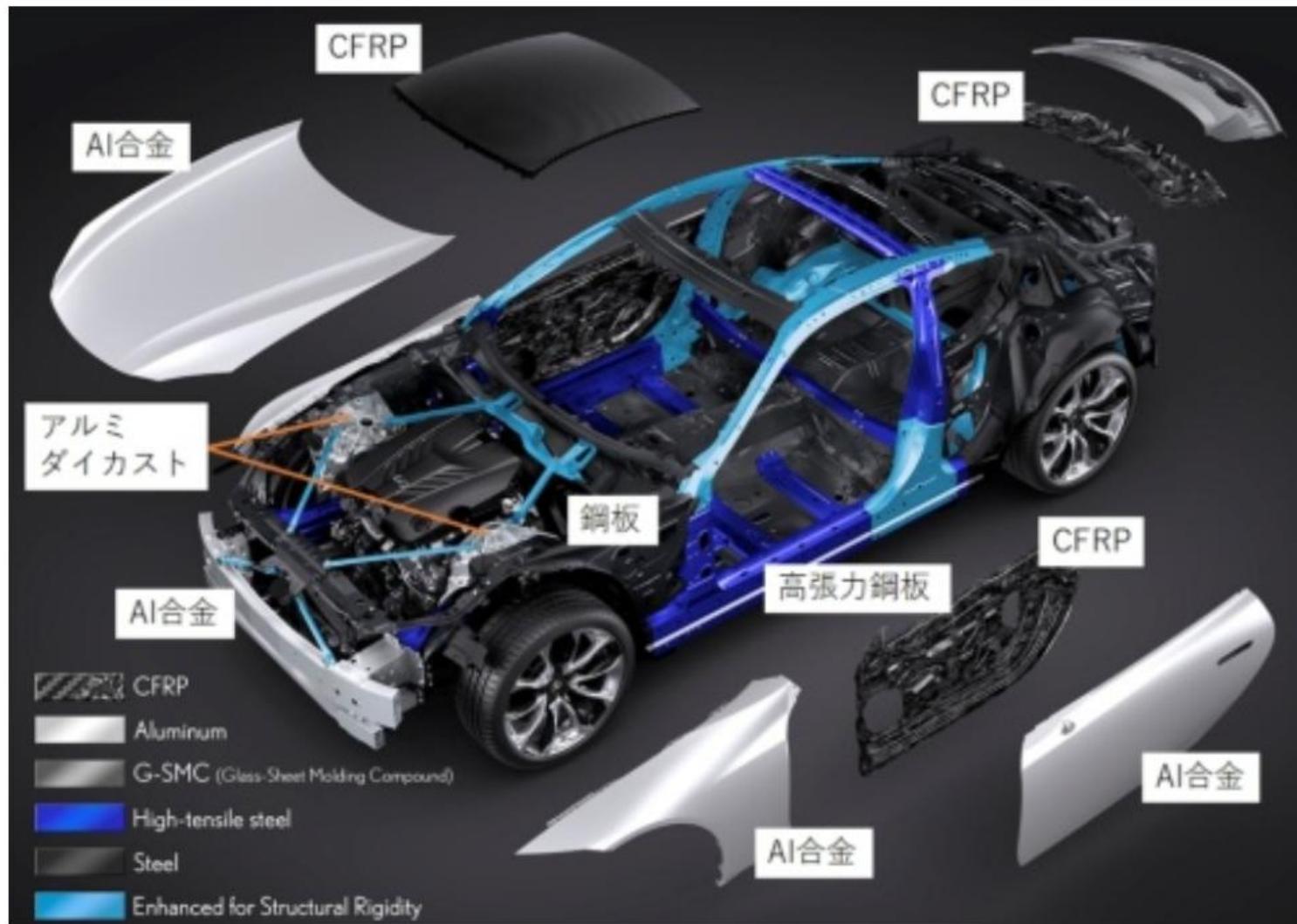
Rr



電池の進化をすばやく取り込む

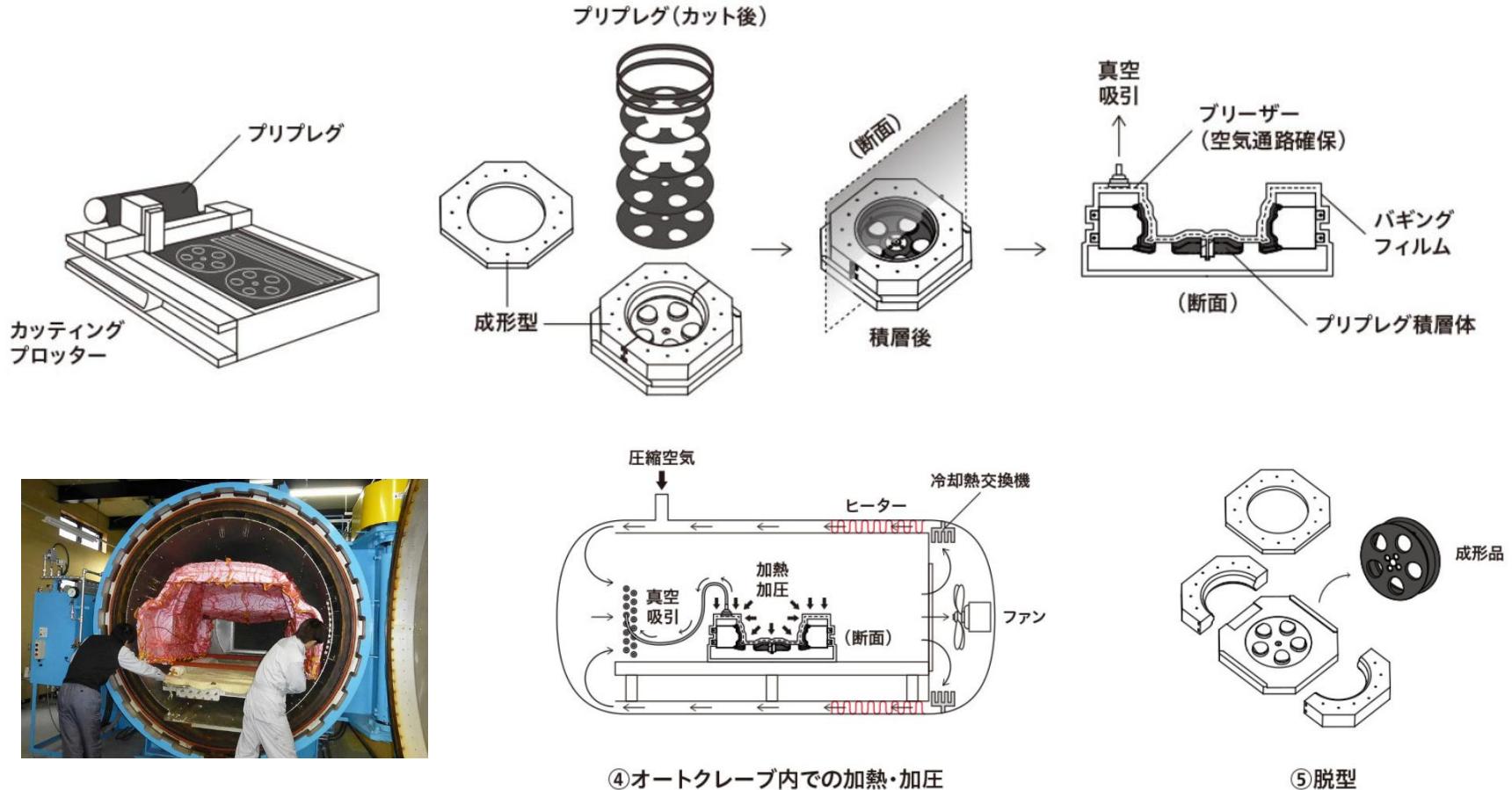
Rapidly incorporate advances in batteries

軽量化の技術 CFRP + 接着技術



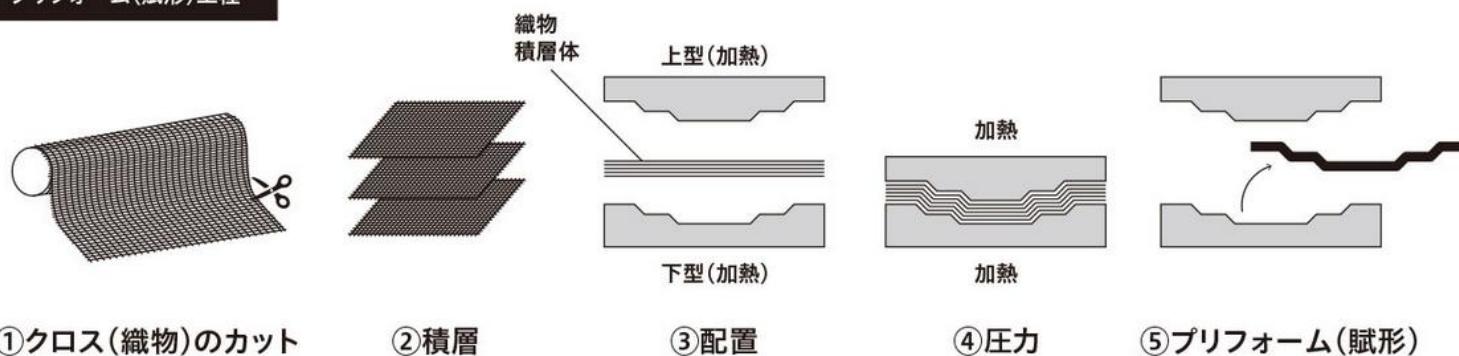
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01169/00002/>

C-FRP作り方（オートクレーブ）

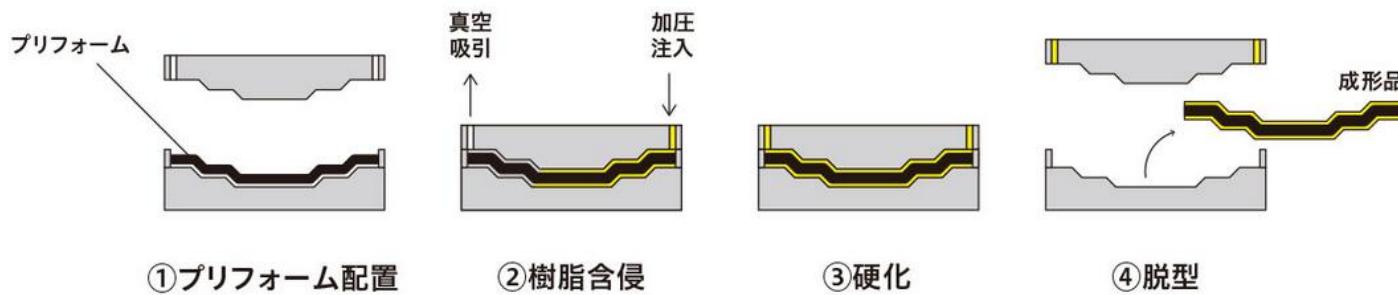


C-FRP作り方（RTM レジントランスファー モールド）

プリフォーム(賦形)工程



成形工程



軽量化の技術 CFRP BMW i3 (EV, レンジエクステンダーEV)



ハッチバック | II銀黒 ■ ■

BMW i3 ベースモデル

支払総額

77
万円

車両本体価格

65.0
万円

通常
ローン価格
月々 9,300円

詳細を見る

年式 2014 (H26)

走行距離 6.3万km

車検 2025(R07)年04月

修復歴 なし

保証付

整備 法定整備付

排気量 不明

ミッション その他AT

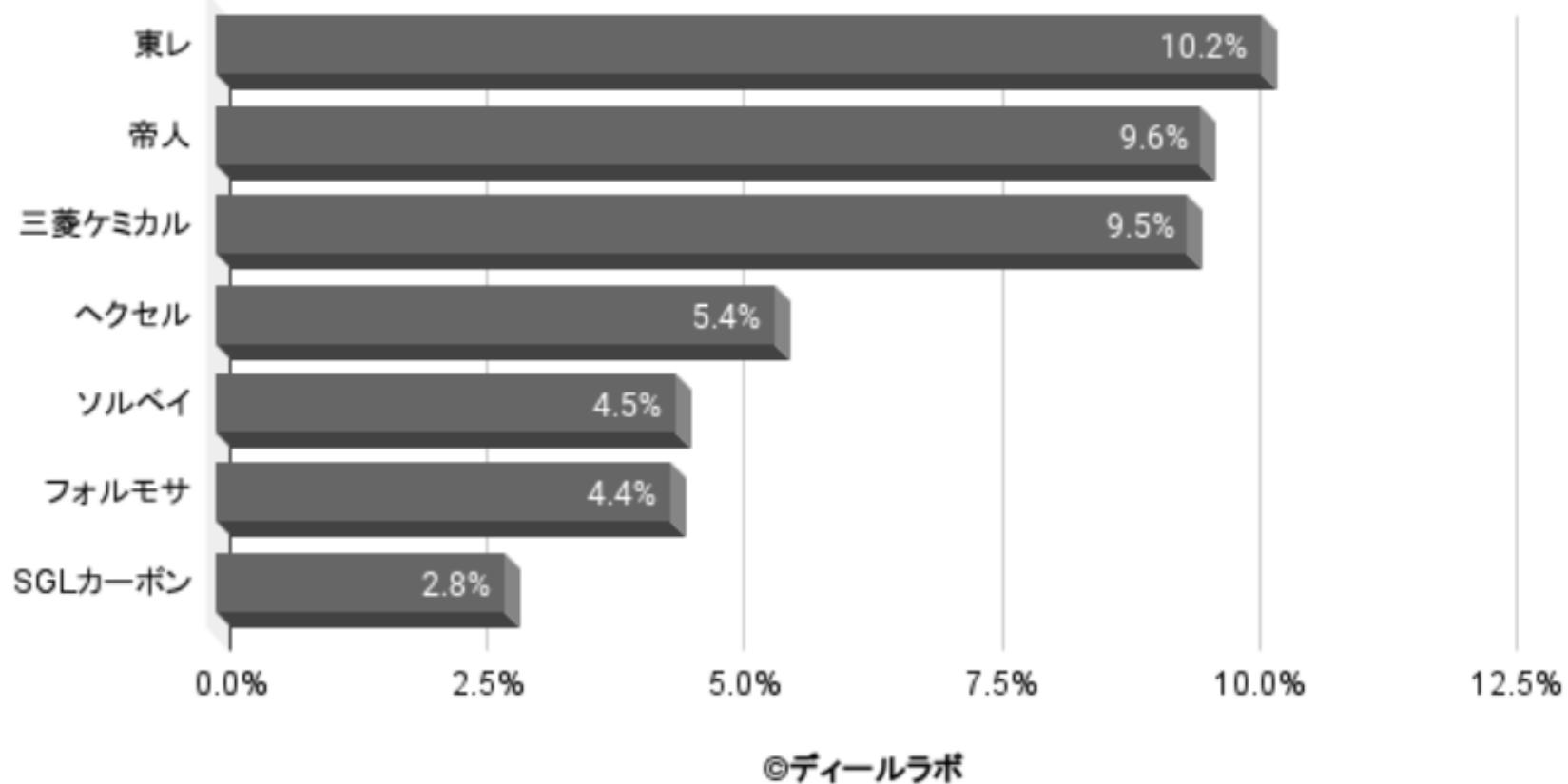
☆お気に入り追加

無料 在庫確認・見積依頼



カーボンは日本が強い

炭素繊維メーカーの世界市場シェア(2021年)



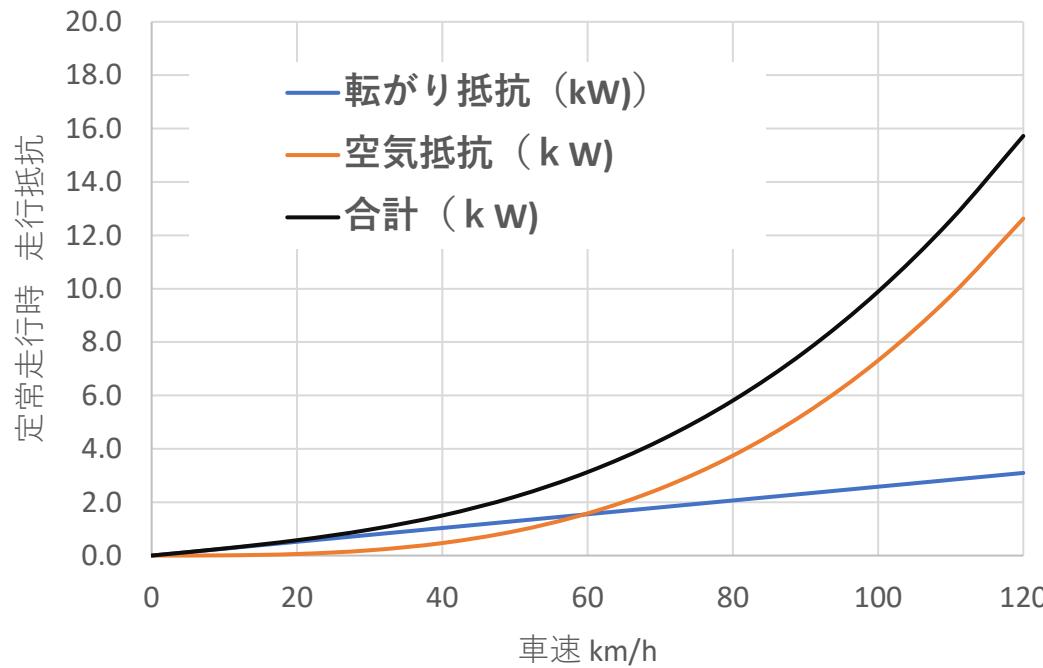
炭素繊維メーカーの世界市場シェア (2021年)

空気抵抗係数

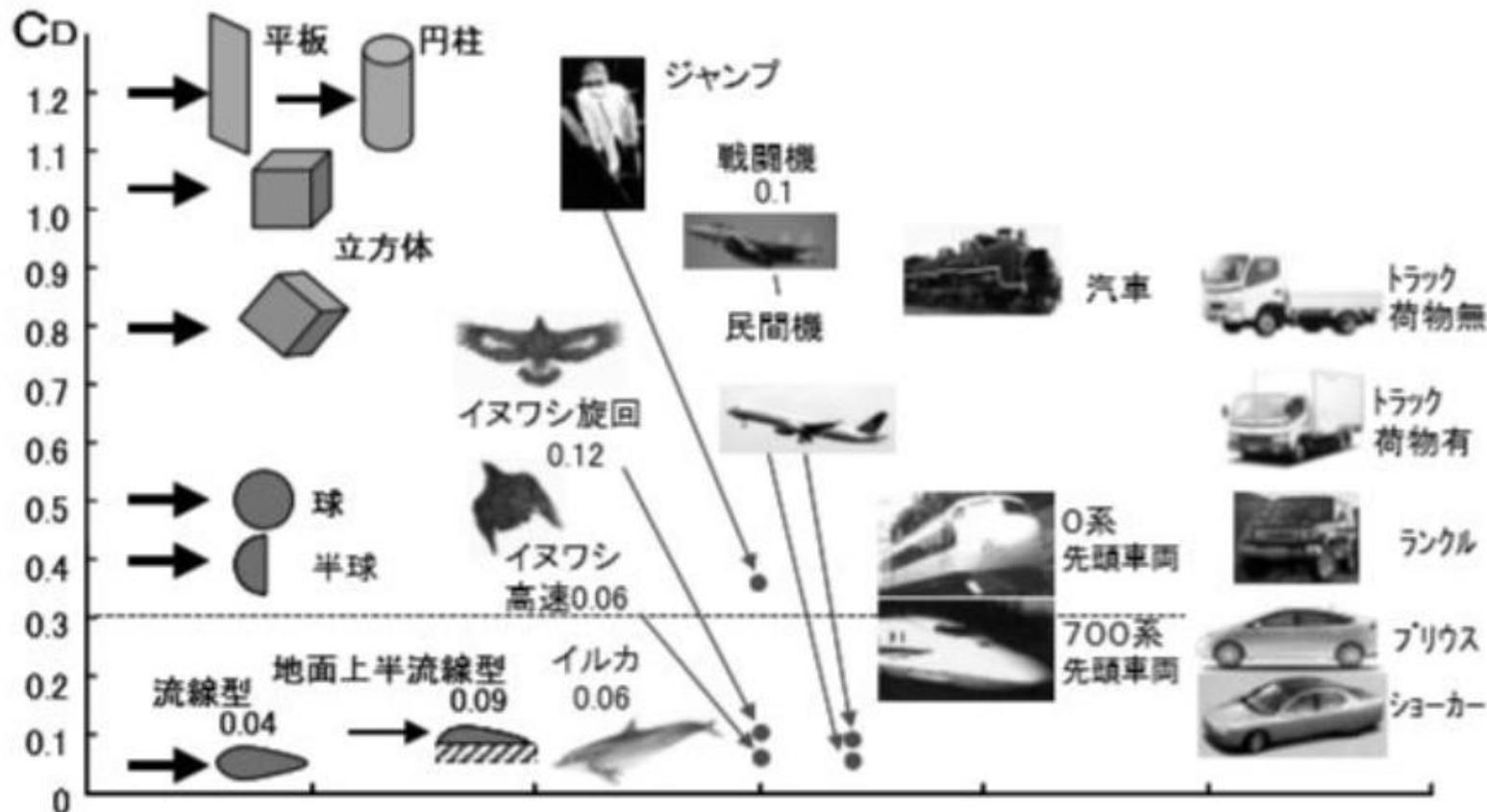
空気抵抗[N] = $1/2 \times$ 大気密度[kg/m³] \times 空気抵抗係数 (CD値) \times 前面投影面積 \times 速度[m/s]²

$$D = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D A$$

- D は物体に作用する抗力
- ρ は流体密度
- U は物体と流体の相対速度
- C_D は抗力係数
- S は流れ方向に垂直な物体の基準面積



空気抵抗係数



出典：トヨタ

たってる人 $C_d = 0.78$
Boeing787 $C_d = 0.024$

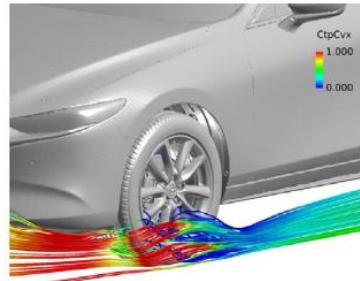


$$Cd = 1.1$$

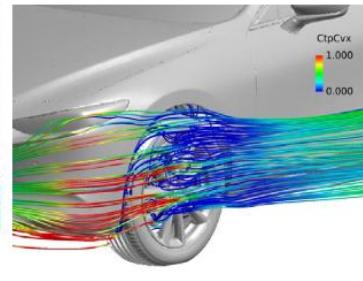
空気抵抗低減の努力



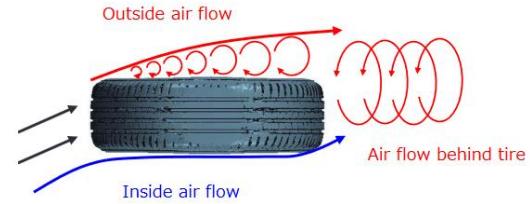
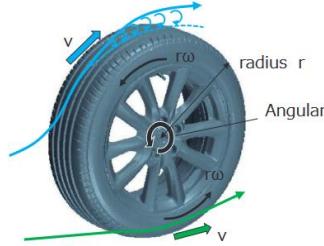
出典: ホンダ



(a) Lower part of the tire



(b) Upper part of the tire



意外と見た目ではわからないCd



新型プリウス Cd = 0.27



4th プリウス Cd = 0.24



RX7 = 0.32



ノア Cd =

空気抵抗低減を頑張ったクルマ



ホンダインサイト $C_d = 0.25$



GT-R $C_d = 0.25$



テスラ モデルS $= 0.208$



ベンツ EQS $= 0.2$

空気抵抗低減をかなり頑張ったクルマ



VW XL1 Cd = 0.189



ホンダソーラーカー Cd = 0.112



ベンツ EQ-XX Cd = 0.17
EVで1200kmの記録



究極の燃費を目指して！

THE MOST EFFICIENT MERCEDES-BENZ

Solar power

feeds infotainment and lights



enabling up to
25 km extra range



<10 kWh/100 km

Electric equivalent of a 1-litre car

Plant-based and recycled interior materials



Drives you to work and back for
1 month on **1 battery charge***

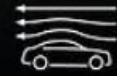


> 1,000 km^{}**



95% of its stored energy is used for propulsion – almost twice that of a human long-distance runner

Even more streamlined than an American football
c_d 0.17***



車両重量1750kg

システム最大電圧900V

最高出力150kW（約204PS）

空気抵抗係数 0.17

バッテリ→動力 95%

ガソリン1リットル エネルギー換算で 8.8kWh

1kWh = 0.113L 1kWh = 20円， 0.113L = 16円

https://en.wikipedia.org/wiki/Gasoline_gallon_equivalent

100km/10kWh = 100km/1.13L = 88km/L

今の各社実力

		交流電力量消費率 (Wh/km)	バッテリー容量 (kWh)	航続距離 (km)	車両重量 (kg)	1 kWhで走行 できる距離 (km/kWh)
日 産	サクラ(X)	124	20	180	1,070	9.0
	アリア(b6)	166	66	470	1,920	7.1
	リーフ(S)	155	40	322	1,490	8.1
三 菱 自	eKクロスEV(P)	124	20	180	1,080	9.0
ト ヨ タ	bZ4X(FWD)	128	71.4	559	1,920	7.8
	C+pod(G)	54	9.06	150	690	16.6
ス バ ル	ソルテラ(FWD)	126	71.4	567	1,910	7.9
マツダ	MX-30	145	35.5	256	1,650	7.2
ホンダ	ホンダe(標準)	131	35.5	283	1,510	8.0
メルセデス・ベンツ	EQA250	180	66.5	423	1,990	6.4
アウディ	e-tron50(quattro)	222	71	335	2,400	4.7
BMW	iX(xDrive50)	183	76.6	450	2,380	5.9
プジョー	e-208(Allure)	144	50	395	1,490	7.9

*交流電力量消費率は国交省審査値(WLTCモード)、「1kWhで走行できる距離」は航続距離とバッテリー容量をもとに日刊自動車新聞が計算した値

海外大学も頑張ってます

オーストラリア・ニューサウスウェールズ大学シドニー校（UNSW）
ソーラーカー「Sunswift 7」
1000kmを一充電の11時間52分
の世界記録
<https://thred.com/ja/tech/students-build-fastest-ever-solar-powered-car-sunswift-7/>



26.3km/kWh Cd 0.095 !

ドイツのStuttgart 大学
0 – 100km/h **1.461**秒の世界記録

<https://www.uni-stuttgart.de/en/university/news/all/Students-break-acceleration-world-record/>



$$27.7\text{m/s}/1.461=1.93\text{G}$$

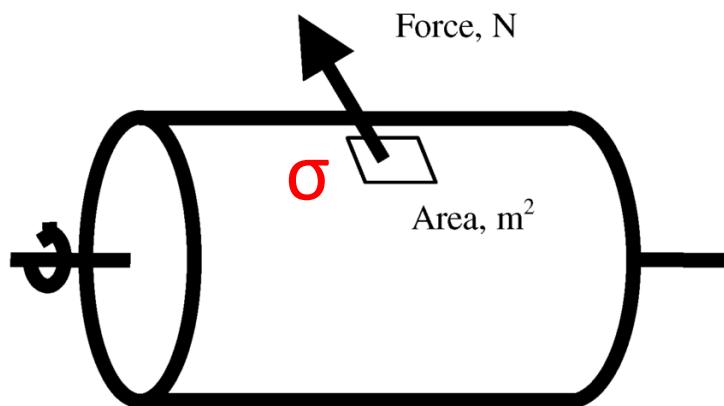
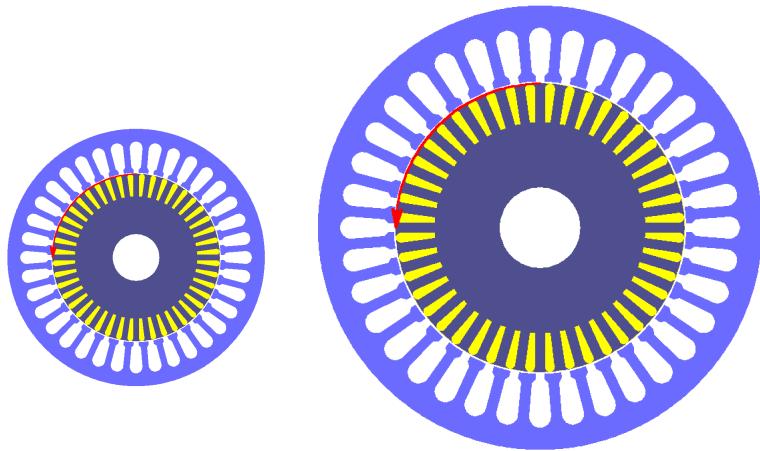
レースタイヤの摩擦係数1.6 (市販車の2倍)

$$F=ma, a=19, m=300\text{kg}(\text{仮}) \quad F = 5600\text{N}$$

$$F=\mu mg, 1.6 \times 300 \times 9.8 = 4700\text{N} \text{を超える!?}$$

$$5600\text{N} \times 0.25 \text{ (タイヤ半径)} / 10 \text{ (ギヤ比)} = 140\text{Nm} \text{ はできる範囲. .}$$

モータ設計してみましょう



σ : せん断力

$$\sigma = J \times B$$

J : 電気装荷

単位長,円弧長1mmあたりのAT/mm²

モータが大きいほど, 冷却が良いほど
大きくなる

(スロット面積は直径の2乗比例)

B : 磁気装荷

平均磁束密度 (T)

磁気飽和で制約を受ける

平均値は $2/\pi \times B_{\text{g}}$

$B_{\text{gpeak}} = \sim 1.2\text{T}$ (ネオジ磁石の場合)

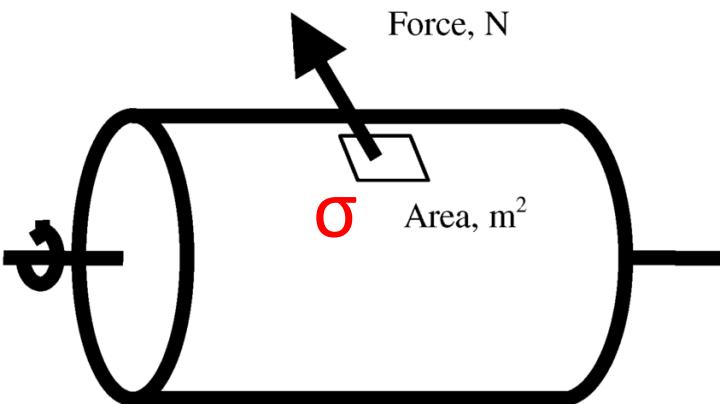
$B = \sim 0.76$

TRV: Torque per unit Rotor Volume

$$T = \pi D_r L \times \sigma \times D_r / 2$$
$$= \pi / 4 D_r^2 L \times 2\sigma$$

$$T = 2\sigma V_r$$

(モータトルクはロータ体積と磁気せん断力 σ に比例する)



$$2\sigma = T/V_r \quad \text{Torque per unit Rotor Volume}$$

$$\text{TRV} = 2\sigma$$

類似サイズ, 類似冷却であれば
類似の値になるので,
初期設計のよりどころとなる

教科書より

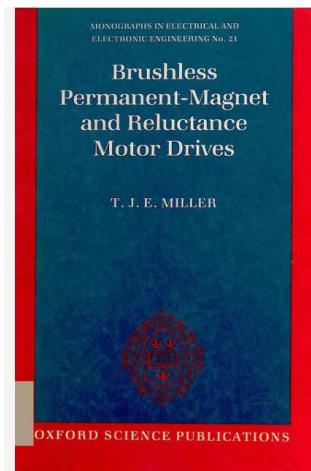
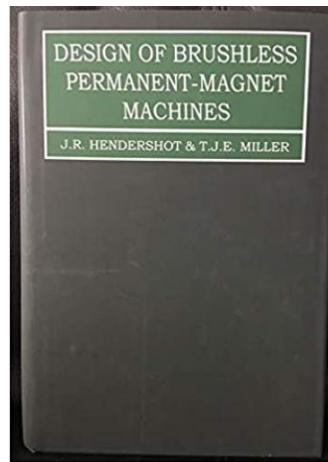


Table 2.1. Typical TRV and σ values for common motor types

Motor type and size	σ (p.s.i.)	TRV (kN m/m ³)
Fractional TEFC industrial motors	0.1–0.3	1.4–4
Integral TEFC industrial motors	0.5–2	15–30
High-performance industrial servos	1.5–3	20–45
Aerospace machines	3–5	45–75
Very large liquid-cooled machines (e.g. turbine generators)	10–15	130–220

“Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives” ISBN-10 0198593694

T. J. E. Miller



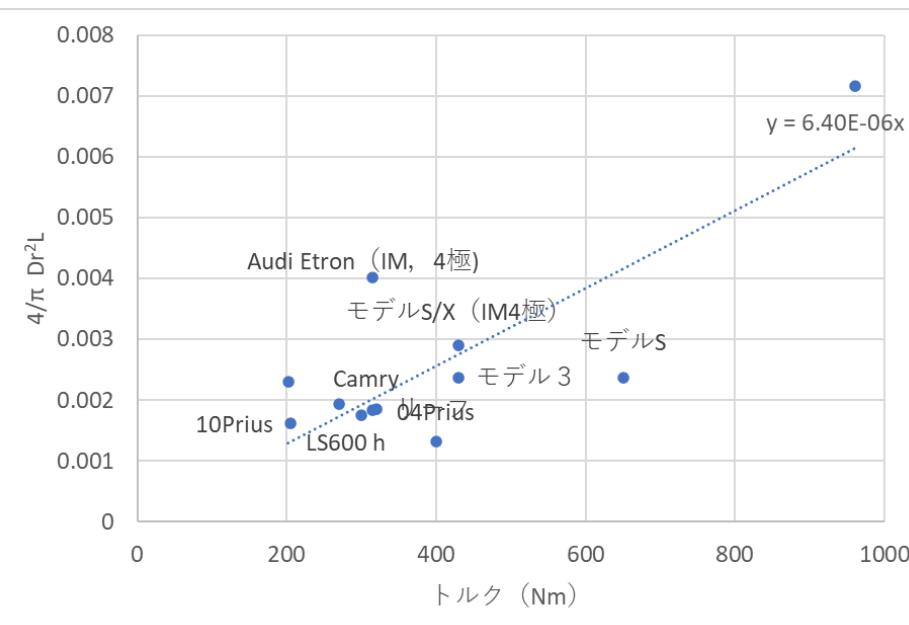
モータ種別	TRV kNm/m ³
全閉フェライト磁石モータ	7 – 14
全閉希土類磁石モータ	14 – 42
全閉希土類ボンド磁石モータ	20
産業モータ（冷却内蔵）	7 – 30
高性能サーボ	15 – 50
航空機用	30 – 75
大型液冷（大型発電機）	100 – 250

“Design of brushless permanent magnet machines” ISBN-10 0984068708

T.J.R. Hendershot and T.J.E. Miller

世の中のモータサーチ（自動車の世界は異常な設計）

車名	モータ方式	冷却方式	バッテリ電圧	電流	最高回転数	最高出力	定格出力	最大トルク	極数	モータ外径	ロータ外径	コア長	$\pi/4Dr^2L(m^3)$	Dr/Ds	ロータTRV(kNm/m³)
リーフ	磁石式	水冷			10500	110	85	320	8	200	130	140	0.001858252	0.650	172.2
モデル3	磁石式	油冷	370	800	17900	192		430	6	250	150	134	0.002367975	0.600	181.6
モデルS	誘導モータ	油冷	320	1200	16000	375		650	6	250	150	134	0.002367975	0.600	274.5
モデルS/X (IM4極)	誘導モータ	油冷	366	900	15000	225		430	4	254	155.8	152	0.0028978	0.613	148.4
Audi Etron (IM, 4極)	誘導モータ	水冷	396	380	15000	140		314	4	245	156	210	0.004013824	0.637	78.2
10Prius	磁石式	油冷	650		13500	60		205	8	246	151.3	90	0.001618118	0.615	126.7
LS600 h	磁石式	油冷	650		10230	110		300	8	263.9	160.5	87	0.001760189	0.608	170.4
Camry	磁石式	油冷	650		14000	70		270	8	263.9	160.5	95.63	0.001934791	0.608	139.5
04Prius	磁石式	油冷	500		6000	50		400	8	236.2	140.72	85.09	0.001323366	0.596	302.3
Accord	磁石式	油冷			13000	135		315	12	268	195.6	61	0.001832979	0.730	171.9
FORD RANGER97	誘導モータ	水冷	250			67		202	4	235	142	145	0.002296331	0.604	88.0



$$\text{Rotor Volume} = 5.69 \times 10^{-6} \times \text{Torque}$$

を平均とすると
平均TRV = $1/5.69 \times 10^{-6}$

$$= 0.176 \times 10^6 \text{ Nm/m}^3$$

$$= 176 \text{ kNm/m}^3$$

既存技術のBEVで普通にやればこの辺が目安で、ここを超えると冷却に工夫が必要となる

この領域は熱容量で持たせているので
本来の限界は電流密度支配で放熱はほとんど利かない

連続定格は、発熱と放熱が釣り合う点で
この最大トルクの半分程度になることが多い