基本の数式

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

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

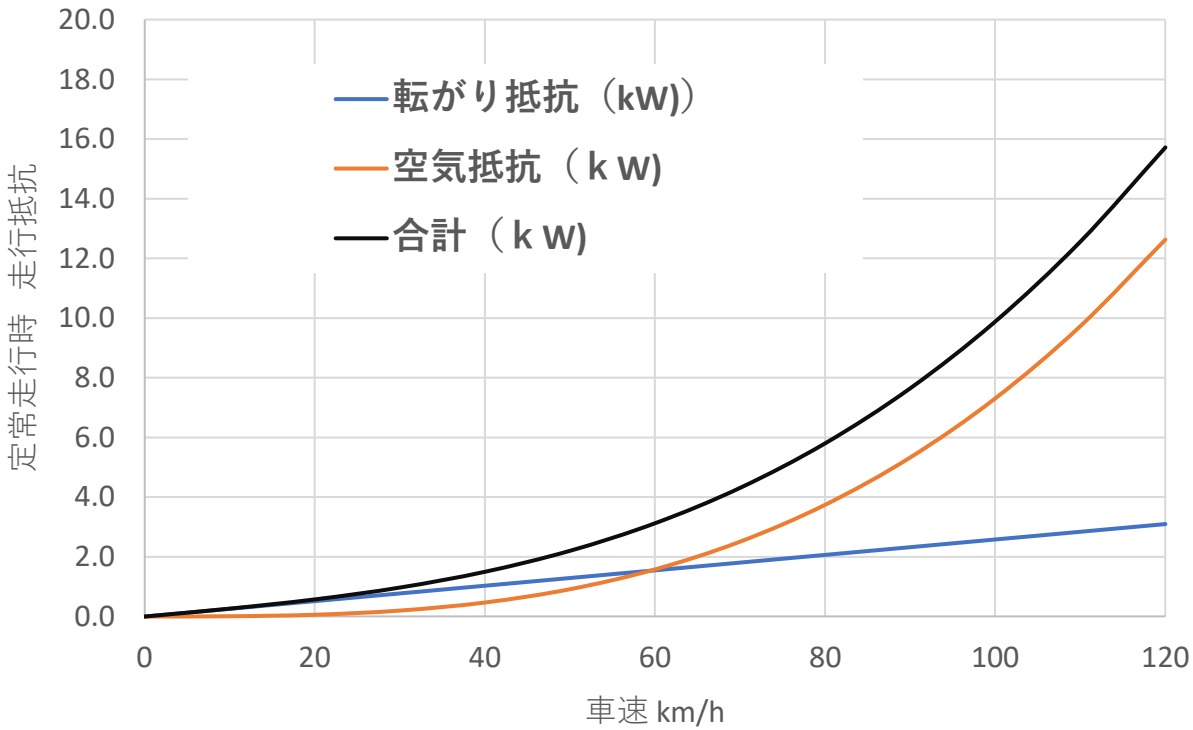
モータ回転数rpm＝クルマ速度（m/s) / タイヤ周長(m)×60×ギヤ比

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）×毎時速度(ｋm/ｈ）

©Mitsubishi Electric Corporation

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] x 重力加速度[m/s2] x **転がり抵抗係数**



©Mitsubishi Electric Corporation

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

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

転がり抵抗性能

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

ウェットグリップ性能

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）

単位(N/kN)

等級	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

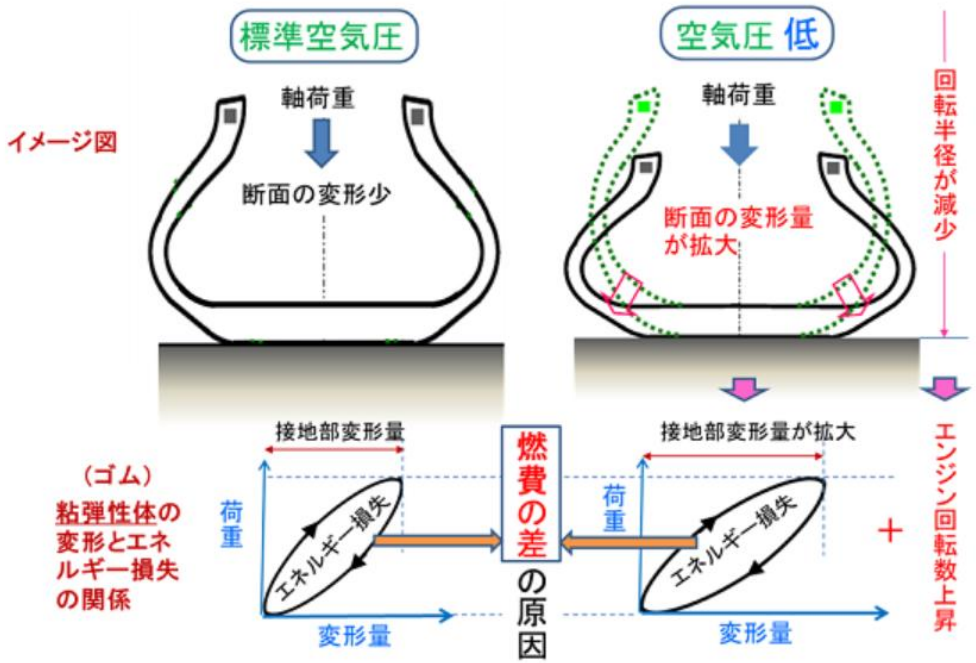
低燃費 ↑ ↓ 低燃費以外

単位(%)

等級	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

©Mi

タイヤの損失は変形繰り返しによるロス

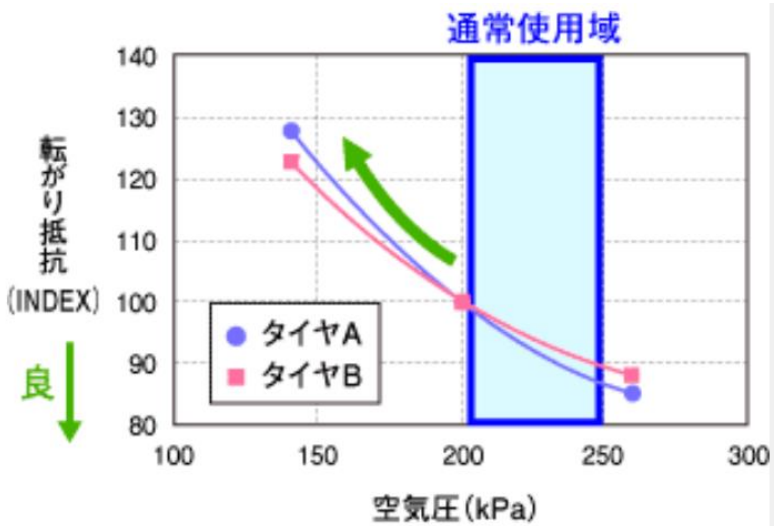


左の図は、タイヤの変形状態を強調して描いたイメージ図です。

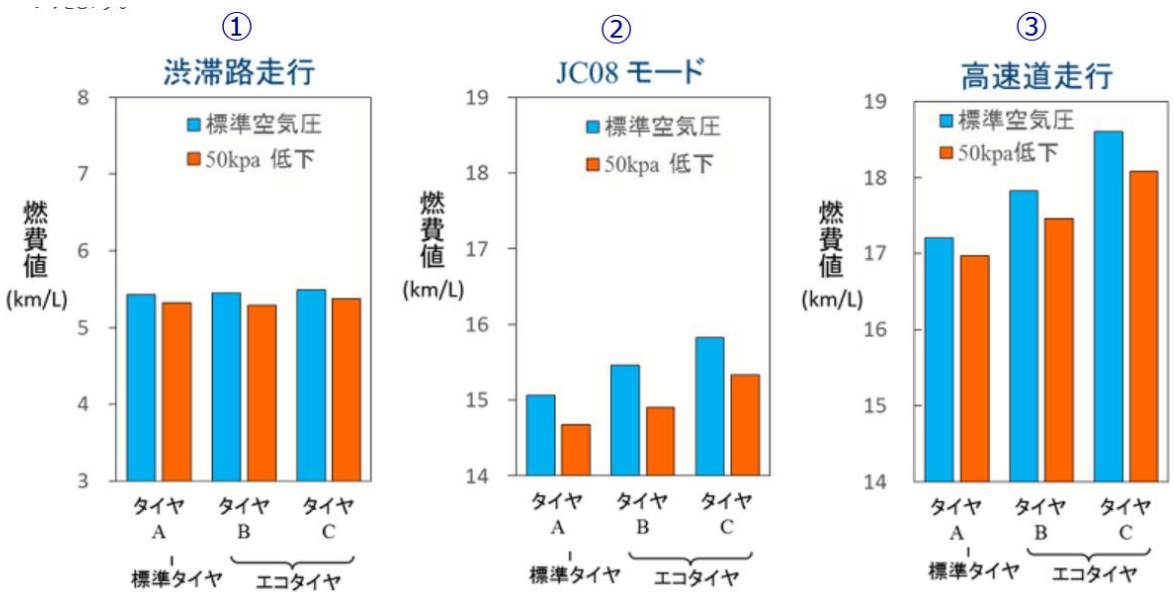
NANO PRO-TECH

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



https://www.ataj.or.jp/technology/tire_evaluation/tire_evaluation-no6.html

©Mitsubishi Electric Corporation

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

交換前 タイヤの転がり抵抗性能 ＼ 交換後 タイヤの転がり抵抗性能	AAA	AA	A	B	C
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

©Mitsubishi Electric Corporation

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

©Mitsubishi Electric Corporation

転がり抵抗のもうひとつの鍵は軽量化

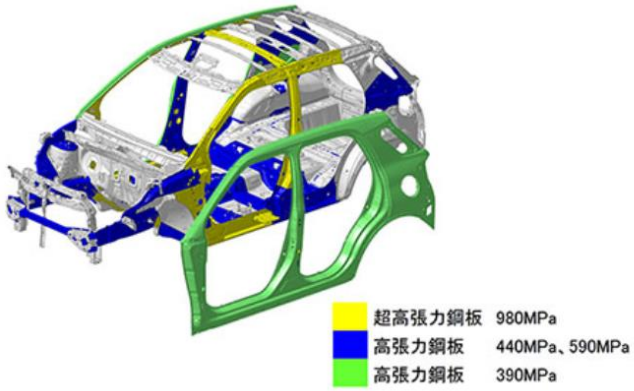
転がり抵抗[N] = **質量[kg]** x 重力加速度[m/s2] x 転がり抵抗係数

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/cm3）	（GPa）	-106	（MPa）	kN·m/kg	（10-6/℃）
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

©Mitsubishi Electric Corporation

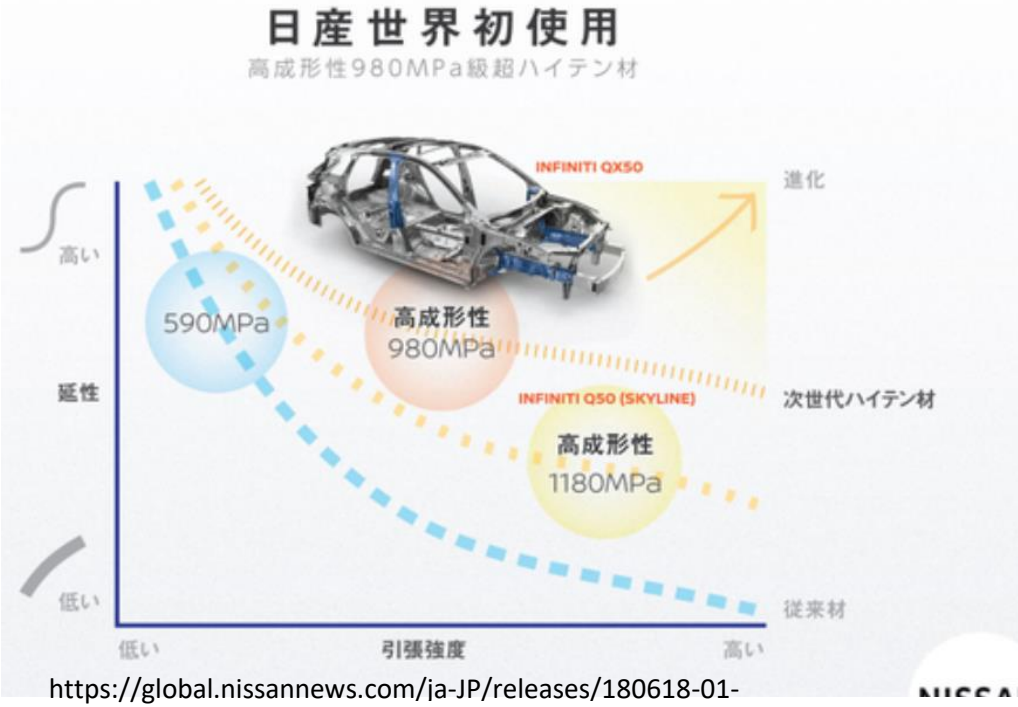
軽量化の技術（高張力鋼板，ハイテン材）

強度が２～３倍高い鉄はあるけど，加工が大変



ロッキー　Dモノコック

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

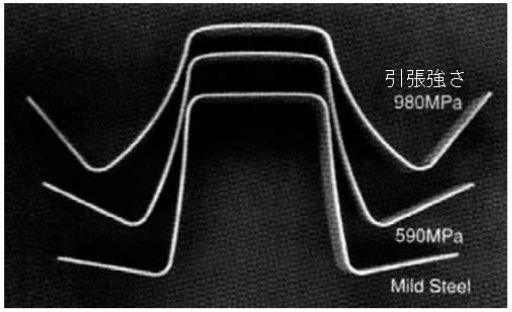


https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/180618-01-j?source=nng&lang=ja-JI

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

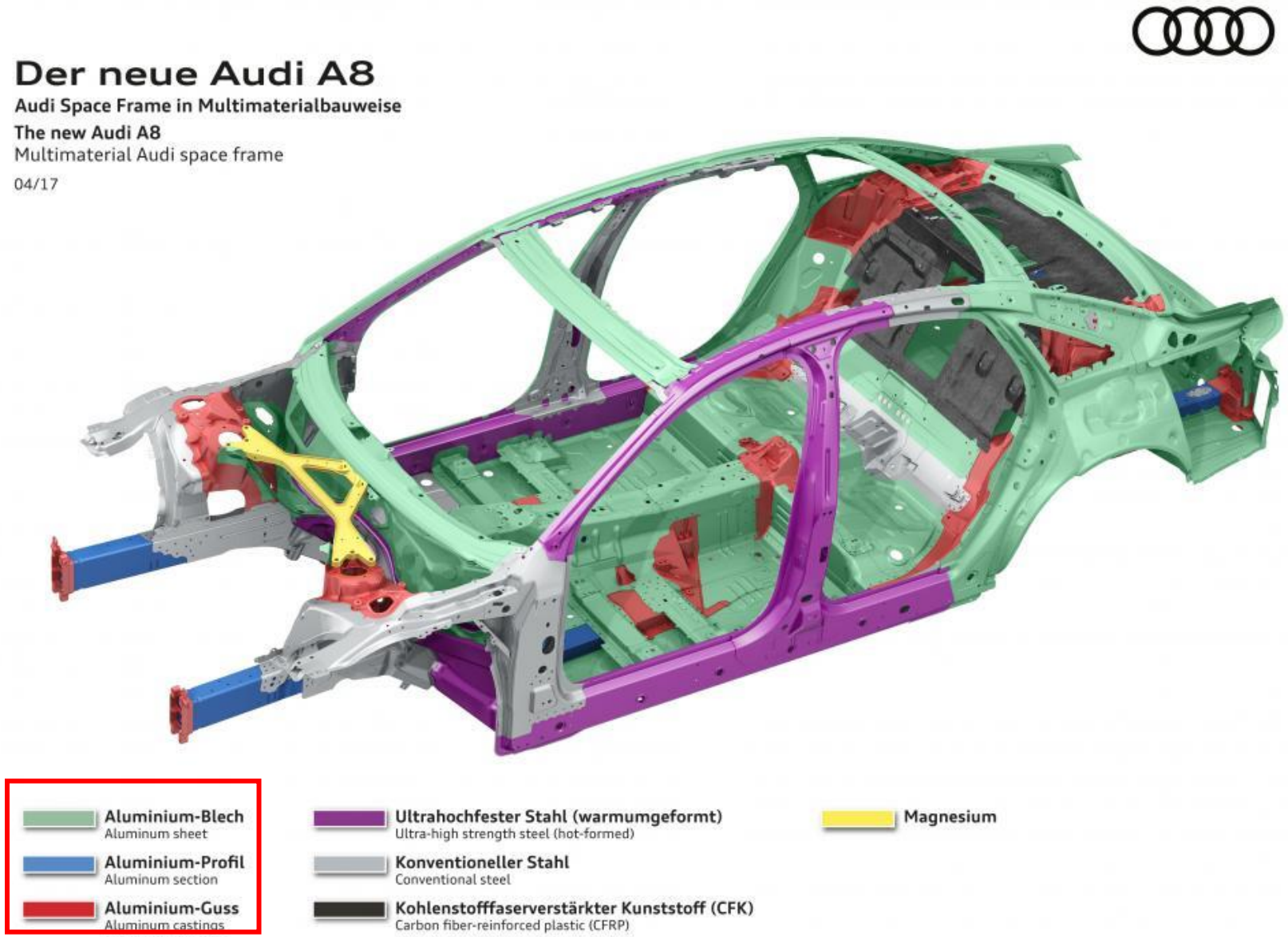
高張力鋼板のハット曲げにおけるスプリングバック



岩谷：プレス技術，42-8(2004)，43
https://plast.me.tut.ac.jp/present/hotstamping2.pdf

©Mitsubishi Electric Corporation

軽量化の技術（アルミ化）



©Mitsubishi

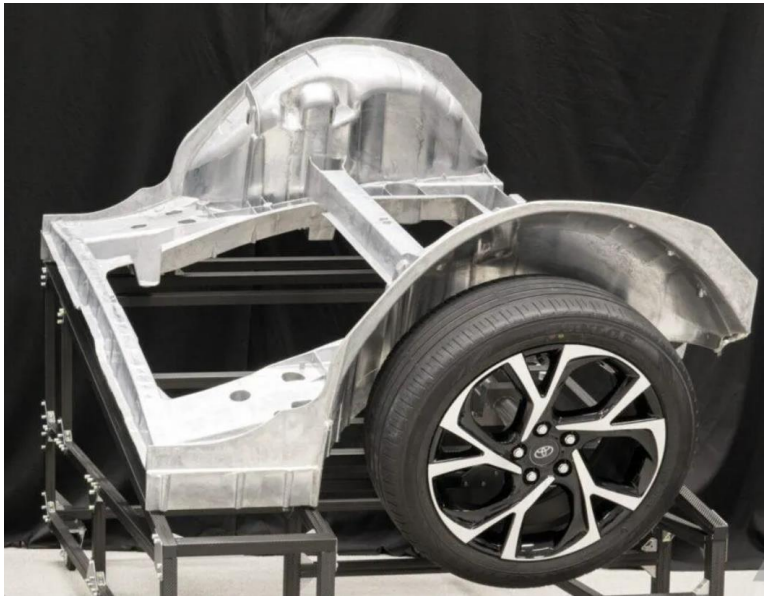
ギガキャスト（テスラが始めた画期的な工法革命）

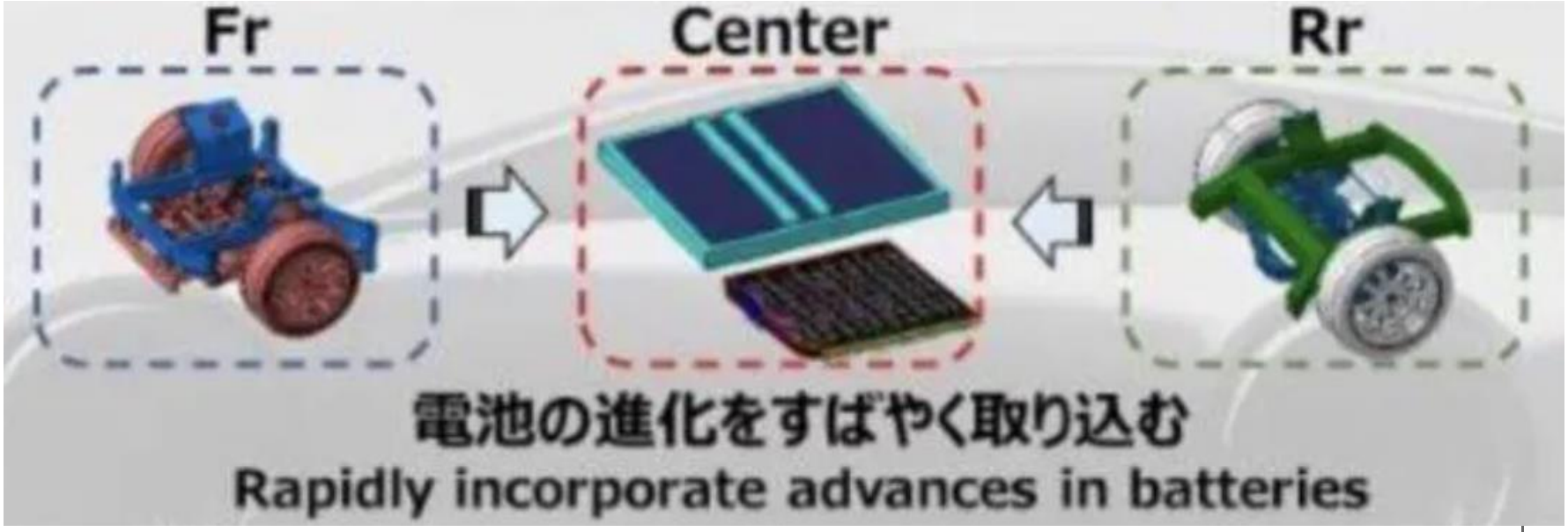
・部品すり合わせ不要

・機械加工で高精度ボデー

・設備無し

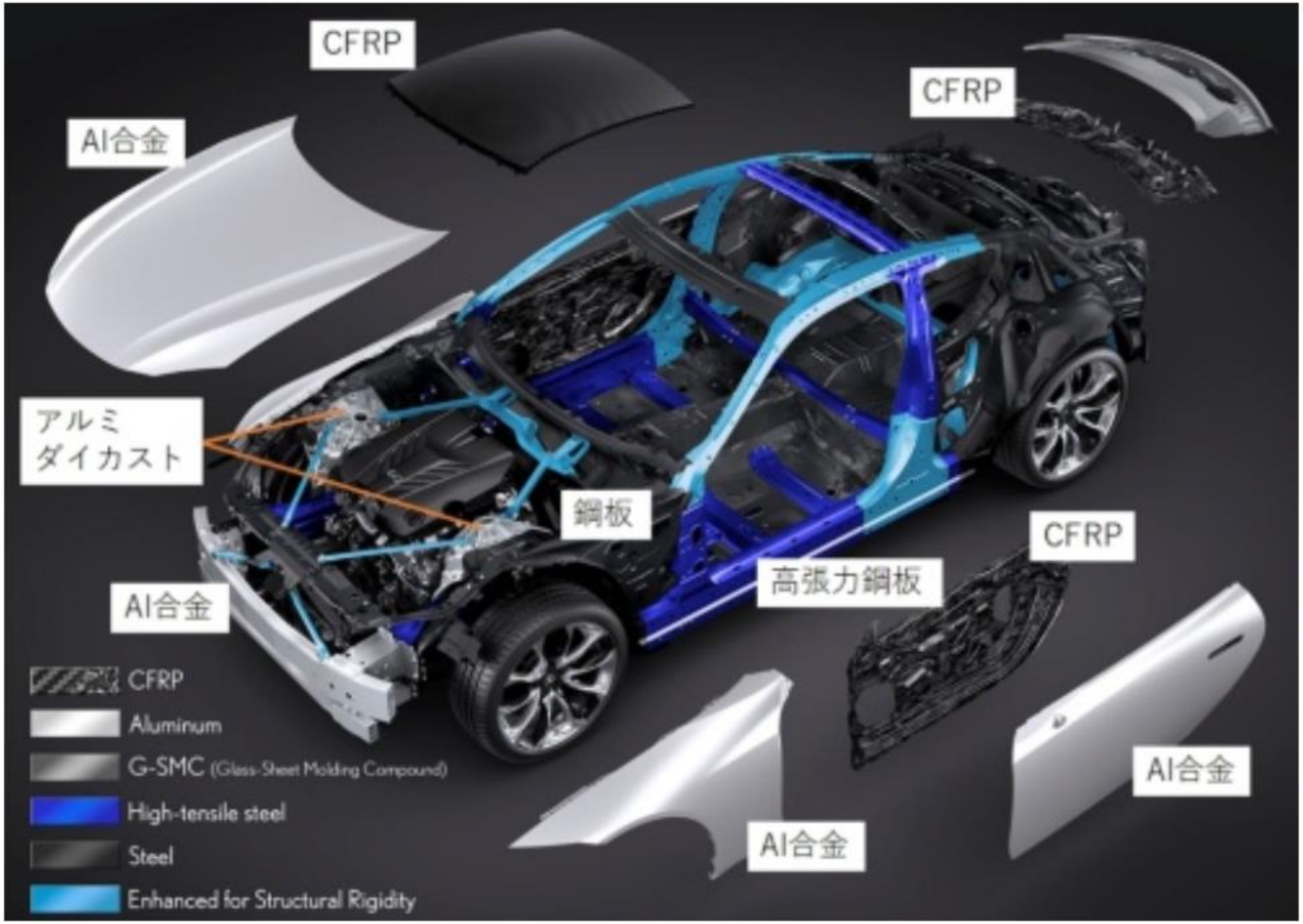
・下から上へ
シンプルに組付





©Mitsubishi Electric Corporation

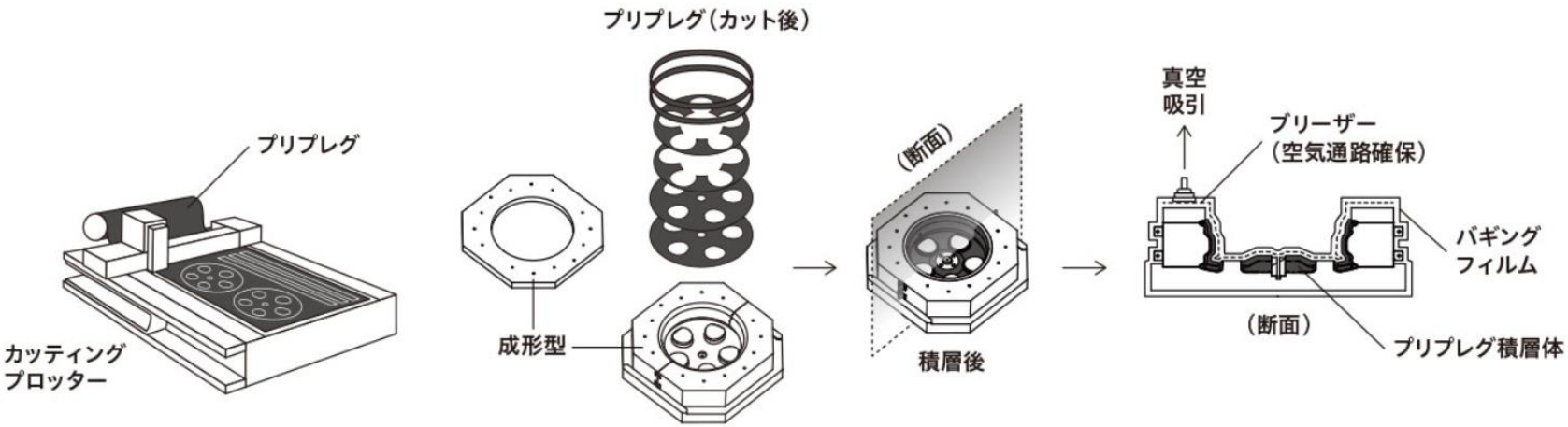
軽量化の技術 CFRP ＋接着技術

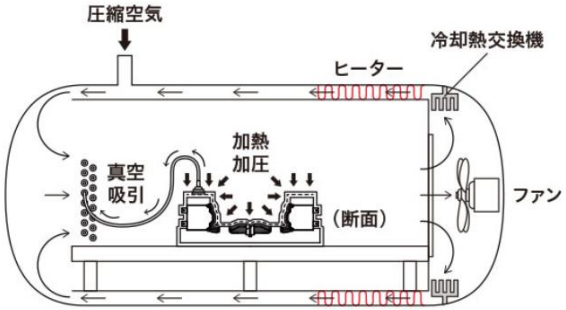


https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01169/00002/

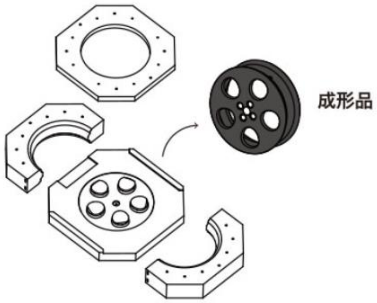
©Mitsubishi Electric Corporation

C-FRP作り方（オートクレーブ）





④オートクレーブ内での加熱・加圧



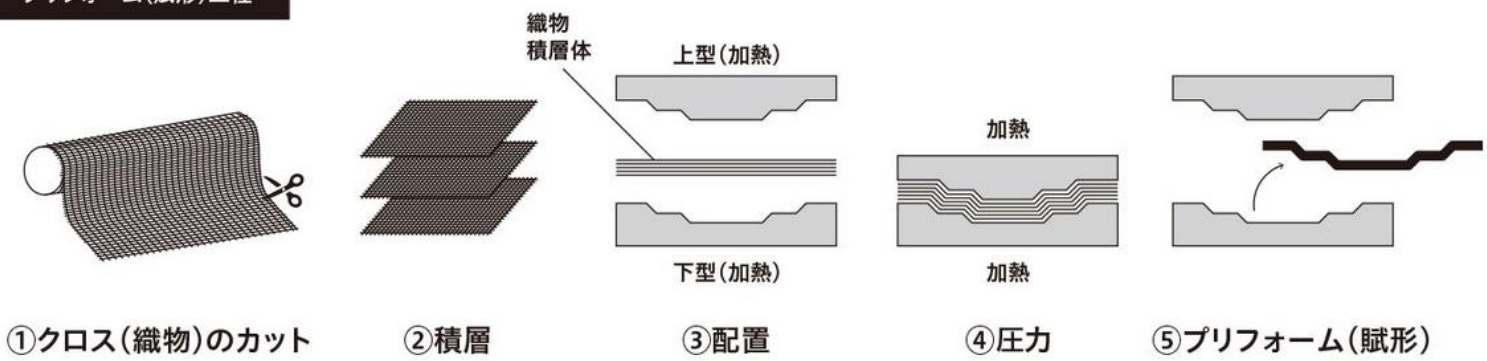
⑤脱型

©Mitsubishi Electric Corporation

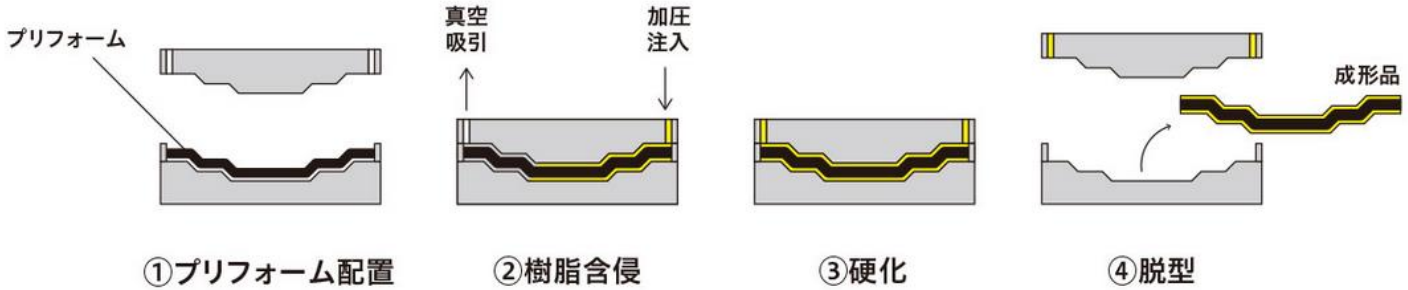
https://www.carbonmagic.com/cfrp/molding.html

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

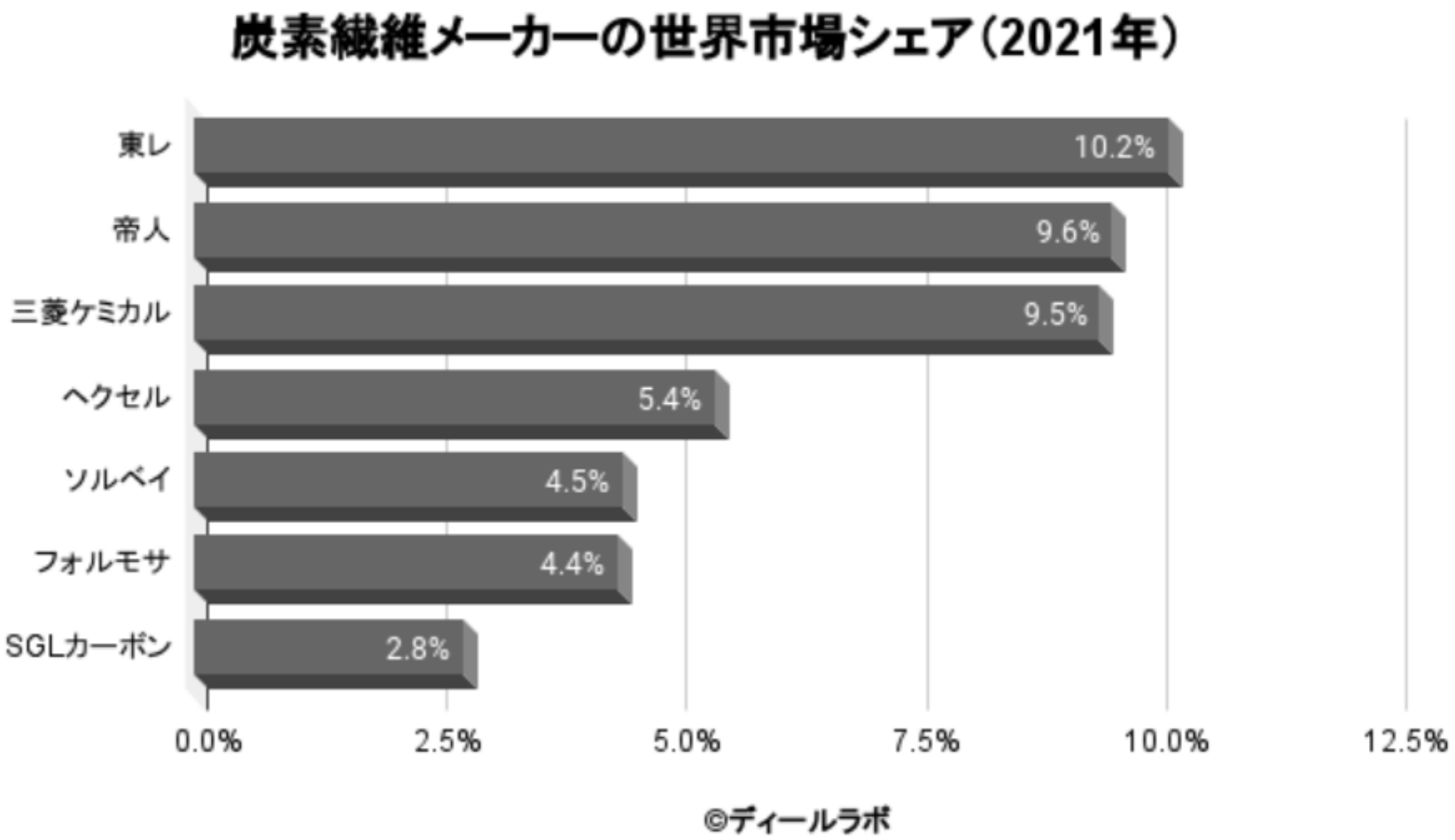


©Mitsubishi Electric Corporation

軽量化の技術 CFRP　BMW i3 (EV, レンジエクステンダーEV)

©Mitsubishi Electric Corporation

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）

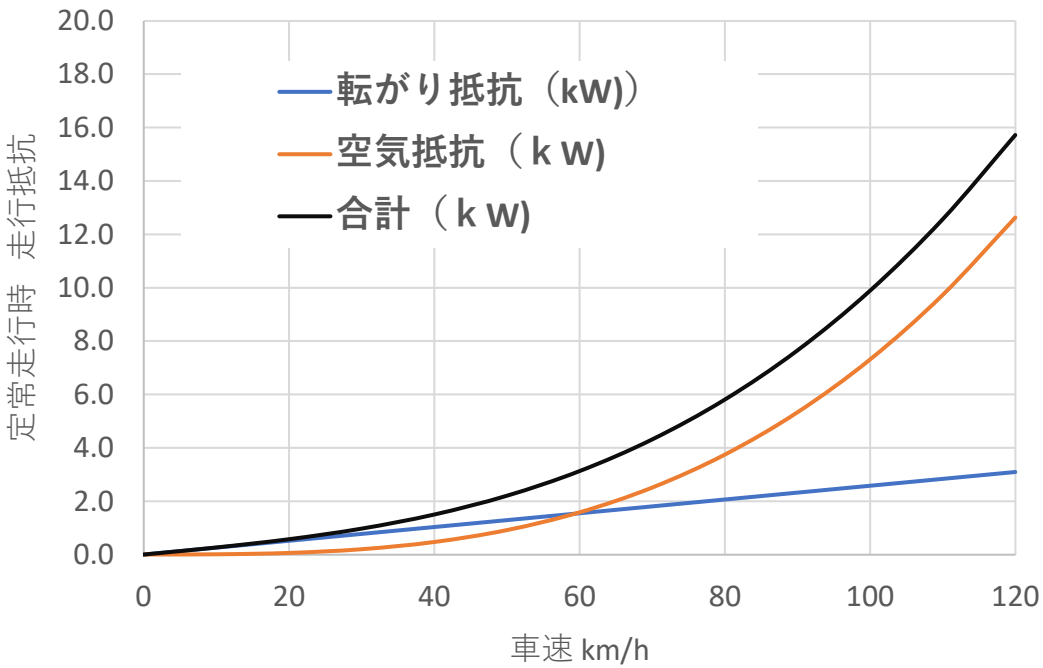
©Mitsubishi Electric Corporation

空気抵抗係数

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

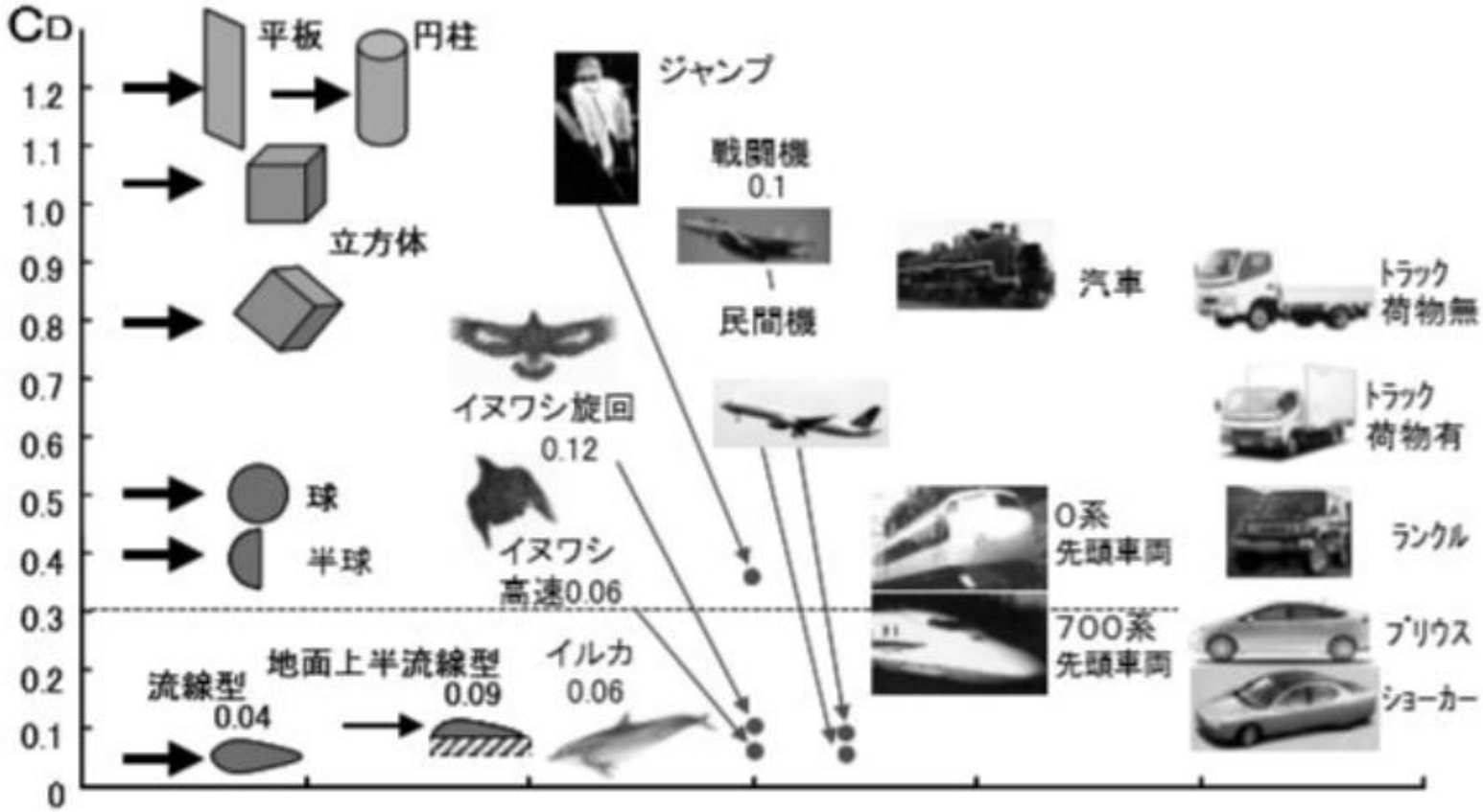
$$D = \frac{1}{2}\rho U^2 C_D A$$

- 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



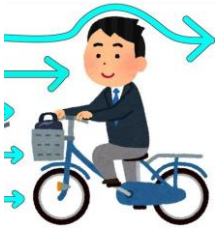
©Mitsubishi Electric Corporation

空気抵抗係数



出典：トヨタ

たってる人 Cd＝0.78
Boeing787　Cd＝0.024

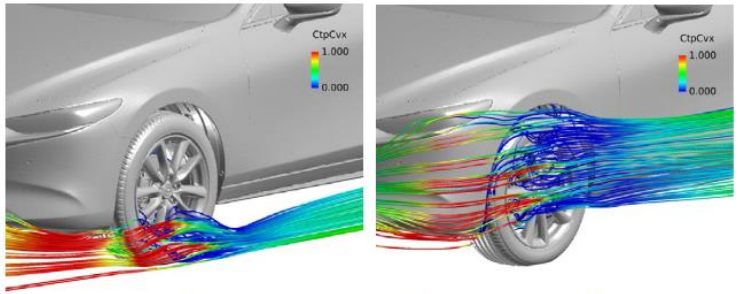


Cd＝1.1

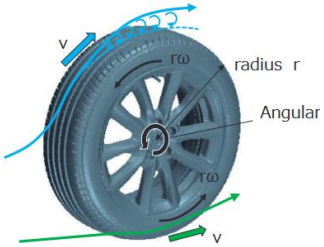
©Mitsubishi Electric Corporation

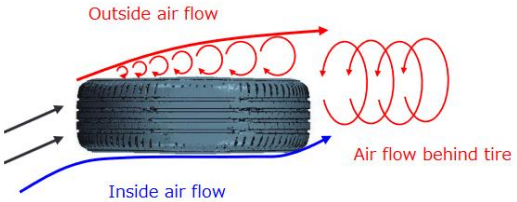
空気抵抗低減の努力

出典：ホンダ



(a) Lower part of the tire　　(b) Upper part of the tire





2020マツダ技報 No.37

©Mitsubishi Electric Corporation

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

ノア Cd＝

RX7＝0.32

©Mitsubishi Electric Corporation

空気抵抗低減を頑張ったクルマ

ホンダインサイト Cd＝0.25

GT-R Cd＝0.25

テスラ　モデルS＝0.208

ベンツ EQS ＝0.2

©Mitsubishi Electric Corporation

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

©Mitsubishi Electric Corporation

究極の燃費を目指して！

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

©Mitsubishi Electric Corporation

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)	1kWh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

https://www.aba-j.or.jp/info/industry/17551/

©Mitsubishi Electric Corporation

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！

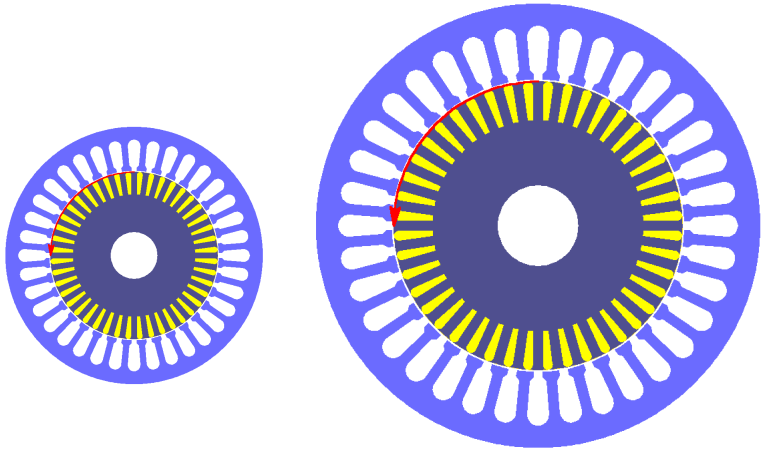
ドイツのStuttgart 大学
0－100km/h 1.461秒の世界記録

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

27.7m/s/1.461=1.93G
レースタイヤの摩擦係数1.6（市販車の2倍）
F=ma ,a=19 , m＝300kg(仮） F＝ 5600N
F=μmg , 1.6×300×9.8 ＝ 4700Nを超える!?
5600N*0.25（タイヤ半径）/10（ギヤ比）＝140Nm
はできる範囲．．

© Mitsubishi Electric Corporation

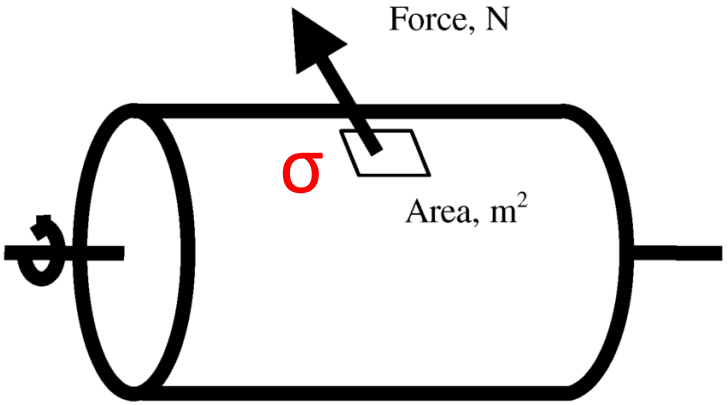
モータ設計してみましょう



σ ： せん断力

σ ＝ J×B

J ：電気装荷
単位長,円弧長1㎜あたりのAT/㎟
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/π×Bg
Bgpeak ＝ ～1.2T (ネオジ磁石の場合)
B ＝ ～0.76

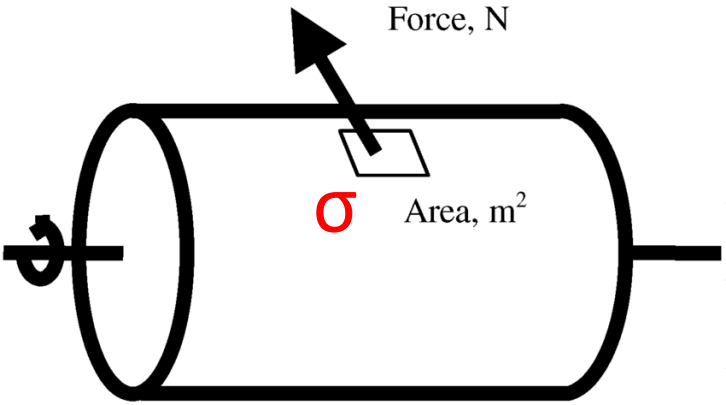
©Mitsubishi Electric Corporation

TRV: Torqure per unit Rotor Volume

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

$$T = 2\sigma V_r$$

（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）



$2\sigma = T/Vr$ Torqure per unit Rotor Volume

$TRV = 2\sigma$

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

©Mitsubishi Electric Corporation

教科書より

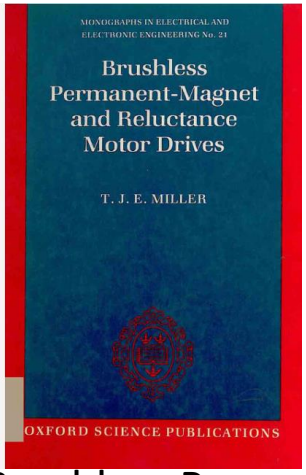
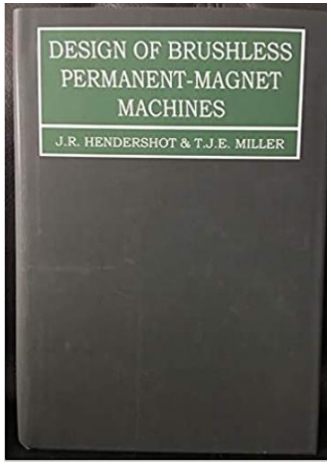


Table 2.1. Typical TRV and σ values for common motor types

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



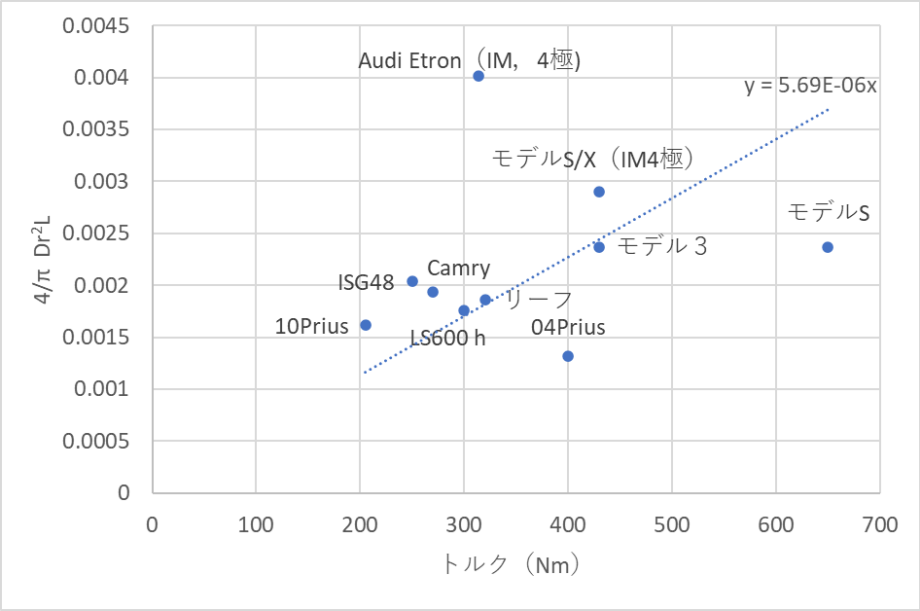
モータ種別	TRV kNm/m3
全閉フェライト磁石モータ	7－14
全閉希土類磁石モータ	14－42
全閉希土類ボンド磁石モータ	20
産業モータ（冷却内蔵）	7－30
高性能サーボ	15－50
航空機用	30－75
大型液冷（大型発電機）	100－250

“Design of brushless permanent magnet machines “ **ISBN-10 0984068708**
T J.R. Hendershot and T.J.E. Miller

©Mitsubishi Electric Corporation

世の中のモータサーチ （自動車の世界は異常な設計）

車名	最大トルク	モータ外径	ロータ外径	コア長	$\pi/4Dr^2L(m^3)$	Dr/Ds	ロータTVR(kNm/m^3)
リーフ	320	200	130	140	0.001858252	0.650	**172.2**
モデル３	430	250	150	134	0.002367975	0.600	**181.6**
モデルS	650	250	150	134	0.002367975	0.600	**274.5**
モデルS/X（IM4極）	430	254	155.8	152	0.0028978	0.613	**148.4**
Audi Etron（IM，4極）	314	245	156	210	0.004013824	0.637	**78.2**
10Prius	205	246	151.3	90	0.001618118	0.615	**126.7**
LS600 h	300	263.9	160.5	87	0.001760189	0.608	**170.4**
Camry	270	263.9	160.5	95.63	0.001934791	0.608	**139.5**
04Prius	400	236.2	140.72	85.09	0.001323366	0.596	**302.3**
ISG48	250	294	228	50	0.002041407	0.776	**122.5**



Rotor Volume = 5.69E-6 × Torque を平均とすると
平均TVR = 1/5.69E-6
= 0.176 ×10^6 Nm/m^3
= 176 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

©Mitsubishi Electric Corporation