

安全と環境対策のための CFRP 乗用車ボディの研究

東京大学大学院工学系研究科環境海洋専攻
安全評価工学研究室 修士二年 46298 山本道隆
指導教官 高橋淳助教授

1. 緒言

地球温暖化、資源枯渇問題が深刻化を増している。その原因の一つに車両による二酸化炭素排出、及び燃料としての石油使用がある。この問題を解決するには車両の効率化が重要である。

車両の走行抵抗は高速の場合を除くとそのほとんどが転がり抵抗、つまり車両重量に比例する。よって、車両の軽量化を進めることにより、車両抵抗を軽減することができる。それにより、車両の効率化が進み、結果として地球温暖化、資源枯渇の両問題の解決を促進させることができると考える。

軽量化素材として現在考えられているものは、アルミニウム、マグネシウム、CFRTS とがある。その中の一つ、CFRTS はその破壊が脆性的であること、また高コストであることから車両に導入する材料としての垣根は高い。そこで現在マトリックスとして使用されている熱硬化性樹脂に変わり、熱可塑性樹脂による CFRTP を実際に試作し、破壊モードの改善及び低コスト化を図る。

本研究では、自作した CFRP の他に金属類軽量化材料も含めその静的・動的挙動の把握を行い、各素材の特徴を明らかにし、最適な車両の軽量化を行う。

2005 年度の日本における交通事故による死者は 5 年連続減少となった。しかし、その内訳を見ると死者のうち、約六割が歩行者であり、かつ六割が頭部の損傷により命を落としている。交通事故死亡者のうち六割が歩行者という値は他国と比較し高い。その原因を探ると、日本国内の道路の複雑な造りがその原因の一つであると考えられる。よって国内における交通事故死者数を減らすためには、より日本国内向けの車両が必要と考えられる。

そこで本研究では車両の軽量化と、歩行者に対しての安全性とを両立させた車両の提案を行った。

2. CFRP の成型

車両のボディ構成材料に対する評価基準には、曲げ剛性、圧縮剛性、衝撃吸収力、耐デント性（小石等が当たってもへこまない）がある。そのうち圧縮剛性、衝撃吸収力に関しては金属類に優位性があると考えられるが、曲げ剛性、耐デント性に関しては CFRP の方が軽量化ポテンシャルは高いのではないかと考えた。

そこで本研究では従来の CFRTS と熱可塑性樹脂による CFRTP の他に、曲げ剛性に強さを特化した CF/PC サンドイッチ材を用意した。

2.1 CFRTP 成型

2.1.1 樹脂選定 樹脂選定には、樹脂単体で衝撃吸収能力に優れること、コスト削減のため樹脂自体が安価であること、車両へ新材料導入の際の企業への負担軽減のため成形性に優れることをポイントとし選出した。その結果、現在も衝撃吸収部位に使用されている、PC(ポリカーボネート)を採用した。

2.1.2 成型 基本的な材料特性を得るため、繊維方向は一方向とした。材料には CF (東レ、T700SC 24K, 1.80g/cc) と PC (出光興産 タフロン R1900, 1.2g/cc) を用いた。Vf が 40% になるように繊維の量を調整し、プレス成形により板を成形した(Table 1)。

2.1.3 サンドイッチ材成型 サンドイッチ材には曲げ剛性の他に衝撃吸収力の改善も期待し、PC をコア材とした Vf の異なる CF/PC サンドイッチ材を二種類成型した。Vf はそれぞれ 20%、10% を目標に成型した。

2.2 CFRTS 成型 熱硬化性樹脂には epoxy 樹脂を、炭素繊維には東レ T700C を用いた。繊維量は CF/PC(Vf40%) と同じ量を使用し曲げ剛性が近い物性を得ることができるようにした。CFRP の物性に関しては繊維使用量で比較を行う必要があるため、材料名には目標 Vf を使用した。

Table 1 Material property of CF/PC and CF/epoxy

	Thickness[mm]	Vf[%]	Density[g/cc]
CF/PC (Vf40%)	1.95	47.5	1.41
CF/PC (Vf20%)	1.87	24.1	1.31
CF/PC (Vf10%)	1.87	12.2	1.23
CF/epoxy (Vf40%)	2.70	33.3	1.37

3. 軽量化材料の特性評価

成型した CFRP と金属類に対して、静的三点曲げ試験、衝撃三点曲げ試験を行い、速度依存性の有無、車両適用の際の軽量化の可能性について明らかにした。

3.1 金属類 金属類には、従来の鉄鋼(SPCC)、アルミニウム(A5052)、マグネシウム(AZ31)を用意した。用意した材料の板厚は、得られた CF/PC(Vf40%) のものと同じ曲げ剛性が出るように設定した(Table 2)。

Table 2 Material property of Steel, Aluminum and Magnesium

	Thickness [mm]	Young's modulus [GPa]	Density [g/cc]
Steel	1.55	206	7.8
Aluminum	2	72	2.8
Magnesium	2.5	44	1.74

3.2 静的三点曲げ試験 試験片は100×15mm、試験速度は5mm/min、支持スパンは80mmとした。評価はASTM D790-02(2002)に準拠した(Fig.1, Fig2, Table3)。

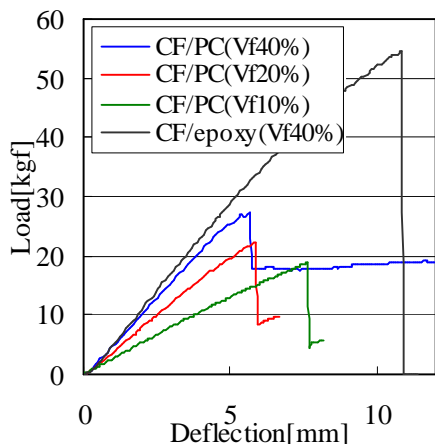


Fig.1 Load-deflection curve of CF/epoxy and CF/PC

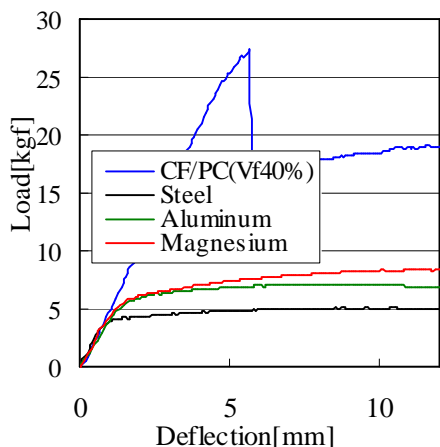


Fig.2 Load-deflection curve of Steel, Aluminum, Magnesium and CF/PC(Vf40%)

CFRP 内では CF/epoxy が最も強度、剛性ともに高い値を示したが、予想されたとおり、降伏後は脆性的に破壊した。一方で CF/PC(Vf40%)は最大荷重の6割程度、CF/PC(Vf20%)は4割程度、CF/PC(Vf10%)は2割程度の荷重を保持し続け、CFRPの脆性的特長を克服しているといえた。この現象は、CFPC内のPCが繊維との境界面で滑ることにより、破壊が徐々に進むことが材料内を亀裂が一度に走ることを抑えたのではないかと考えられる⁽¹⁾。その巨視的な例としてCF/PC

Table 3 Experimental results of bending tests

	Young's modulus [GPa]	Strength [MPa]
CF/PC (Vf40%)	87.2	908
CF/PC (Vf20%)	76.1	810
CF/PC (Vf10%)	49.8	681
CF/epoxy	92.5	1950
Steel	169	334
Aluminum	62.4	293
Magnesium	37.2	202

サンドイッチ材は、圧縮側が層間剥離を起こしたにも関わらず荷重をある程度保持し破壊がゆっくりと進んだことがあげられる。一方、金属三種類はほぼ同じ曲げ剛性を示したがその中では Mg は最も最大荷重が高くまた加工硬化現象が強く出た。

3.3 動的三点曲げ試験 試験片は80×10mm、衝撃速度は1.26m/sec、支持スパンは60mmとした。評価はJIS K 7084に準拠した。試験器具には INSTRON 社製 Dynatup5250-HV を使用した。

各試験片に対し、4.0Jのエネルギーを加えそのときに得られる荷重たわみ線図から、支持治具を外れるまでのたわみ30mmまでの衝撃吸収エネルギー及び耐デント性(弾性変形内吸収エネルギー)にて材料の動的特性を評価した(Fig.3, Table4, Fig.4)。

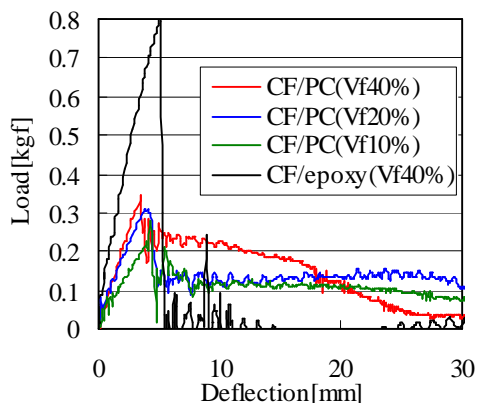


Fig.3 Load-deflection curve of CFRP by impact test

Table 4 Experimental results of impact tests

	Maximum load [N]	Total Energy[J]
CF/PC (Vf40%)	0.340	4.47
CF/PC (Vf20%)	0.263	4.15
CF/PC (Vf10%)	0.329	2.88
CF/epoxy (Vf40%)	0.767	2.17
Steel	0.142	3.72
Aluminum	0.177	3.79
Magnesium	0.181	4.83

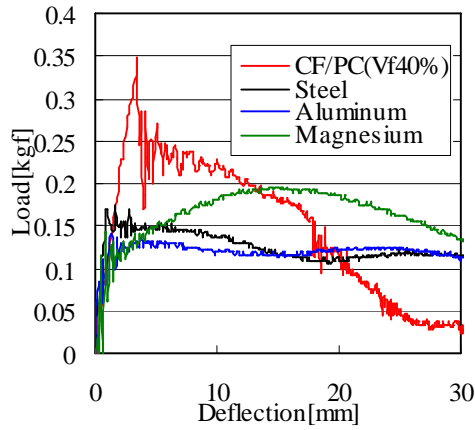


Fig.4 Load-deflection curve of metal by impact test

CF/epoxy は保持荷重は高いが脆性破壊を起こし、CF/PC との破壊の様子の違いが明らかになった。また、CF/PC は静的三点曲げの時と比較すると、速度依存性は無かったが、延性破壊の性質により高い衝撃吸収力を示した。Steel は速度依存性の影響で、静的三点曲げの時よりも高い荷重を示したが、高い密度のため重量あたりの衝撃吸収値は低かった。一方で、Magnesium も速度依存性の影響があり、軽量ながらも高い衝撃吸収値を示したため、衝撃吸収用部材としての利用が考えられる。

3.4 材料特性比較 各材料の軽量化効果を見積もるため、曲げ剛性あたりの Steel に対しての各特性をまとめた。それによると CF/PC は圧縮剛性以外は Steel より優れていることが分かった。特に衝撃吸収力、耐デント性において優位性が見られる。Magnesium も軽だけでなく、特に曲げ剛性、衝撃吸収力が優れていることを示した(Table5)。

Table 5 Summary of the experimental results compared to steel

Material Properties per flexural stiffness	Compressive stiffness	Weight	Total Energy	Dent
CF/PC (Vf40%)	0.566	0.260	1.38	3.72
CF/PC (Vf20%)	0.488	0.250	1.38	2.78
CF/PC (Vf10%)	0.365	0.271	1.11	1.78
CF/epoxy (Vf40%)	0.632	0.332	0.633	—
Steel	1.00	1.00	1.00	1.00
Aluminum	0.530	0.545	1.20	0.588
Magnesium	0.415	0.433	1.57	0.602

4. 現行車両の軽量化⁽²⁾

これまでに得られた材料により車両軽量化を行う土台として、まず現行車両モデルを作成した。参考には本田技術研究所のインサイトをモデルとした⁽³⁾。全長は 3940mm、全幅は 1695mm、全高は 1355mm、車両

重量は 850kg、乗車定員は 2 人である。

4.1 車両設計基準 車両の設計基準には、車両曲げ剛性基準、車両ねじり剛性基準、外板張り剛性、外板耐デント性がある。その中でホワイトボディの設計には車両曲げ剛性及び車両ねじり剛性で設計を行う。

4.1.1 車両曲げ剛性 ホイールベース中央部付近に荷重 W を負荷する曲げ試験に対応するように、FEM 解析を行う。ホイールベース間距離を L 、タイヤから荷重点までの距離を b とし、解析の結果得られた、ホイールベース間での最大たわみ量を δ 、タイヤから最大たわみ発生点までの距離を x とする。それらの値から、式(1)のような車体サイズに依存しない曲げ剛性の評価基準を求める。

$$\frac{EI}{L^3} = \frac{Wbx}{6L^3\delta} (L^2 - b^2 - x^2) \quad (1)$$

4.1.2 車両ねじり剛性 右前輪中心部に下向き荷重 W を負荷するねじり試験に対応するように、FEM 解析を行う。タイヤ間距離を R と設定し、解析の結果得られた荷重点でのたわみ量を δ とする。それらの値を式(2)に代入してねじり剛性の評価基準を求める。

$$\frac{GJ}{L^3} = \frac{WR^2}{\delta^2} \quad (2)$$

4.2 現行車両の最適化 車両軽量化の事前準備として、現行車両の板厚最適化を行った。

4.2.1 感度解析手法 板厚最適化には増分法による感度解析手法を用いた。

感度 = (各剛性変化量) / (車両重量変化量) とし、その部材の曲げ・ねじり感度の全感度における割合の和が、各部材間で等しくなるようにループ解析を数回繰り返し、板厚を決定した。剛性については曲げ剛性とねじり剛性による解析にて評価した。その一例として、パネル部材の車両ねじり剛性は以下のように変遷し、ボディ上部の車両ねじり剛性に対する重要性を示している(Fig. 5)。

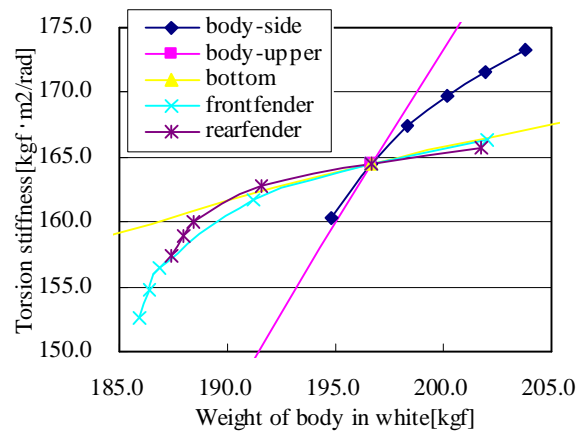


Fig.5 Sensitivity curve of panels for torsional test

4.2.2 評価基準 通常の車両は曲げ剛性が 80

EI/L³ 300、80 GJ/L³ 120 の範囲で設計されている。それをもとに自作した車両の感度解析を行った結果、曲げ剛性が79.3、ねじり剛性が215 となった。以後の車両についての評価基準は、この値をもとに比較を行った。

4.3 各軽量化素材の部位総代替 はじめの軽量化は部品総代替から行った。採用した材料は、Aluminum、CF/PC(Vf40%)、CF/PC (Vf20%)である。Magnesiumはその成型に多くの問題が残っていることからフルモデルへの導入は行わなかった。その結果、軽量化に成功したのはアルミモデルのみであった(Table 6)。

Table 6 Body weight and respective weight reduction rate

Material	Thickness [ratio]	Weight [kg]	Reduction ratio[%]
Steel	1.00	199	
Aluminum	2.51	181	9.03%
CF/PC	5.99	220	-10.5%
CF/PC (Vf20%)	8.22	287	-44.4%

CF/PC(Vf40%)及び CF/PC(Vf20%)を用いた車両が鉄鋼車両よりも重くなった原因は、車両には圧縮剛性が必要となる部位と、曲げ剛性が必要となる部位が混在しているためである。曲げ剛性が必要となる部材に関しては軽量化を成功できたが、そうでない部位に関しては逆に重量がかさんでしまったと考えられる。よって、CF/PC(Vf40%)の車両への適用には適用する部位を選ぶ必要があると考えた。CF/PC(Vf20%) CF/PC(Vf10%)はその圧縮剛性の無さから、車両ボディへの適用には問題があることが分かった。

4.4 アルミ CF/PC(Vf40%)ハイブリッドモデル 軽量化材料を導入し唯一軽量化効果があったアルミモデルに対し、さらに軽量化の可能性を探るために、CF/PC(Vf40%)とのハイブリッド構造を提案する。

すなわち、3章の結果より、アルミは軽量化素材の中で一番圧縮剛性に優れた材料であること、また、CF/PC(Vf40%)は Mg よりも曲げ剛性に優れ、かつサンドイッチ材ほど圧縮剛性に劣らない材料であることから、圧縮剛性が支配的な部材にはアルミニウムを、曲げ剛性が支配的な部位には CF/PC(Vf40%)を導入しその軽量化効果を試算した(Fig.6, Table7)。

Table 7 Weight of cars and respective weight reduction rate

Model	Thickness [ratio]	Weight [kg]	Reduction ratio[%]
Steel	1	199	
Aluminum	2.51	181	9.03%
CF/PC-Hybrid	-	169	15.10%

スチールモデルの場合と同様に感度解析を行った結果、約 15%の軽量化に成功した。傾向として、ボディ上部には CF/PC(Vf40%)による軽量化が可能であることが分かり、ボディ上部は曲げ剛性が支配的な荷重であることを示している。また、感度解析結果によると、ボディ上部は車両ねじり剛性に対して大きく関与している事が分かった。

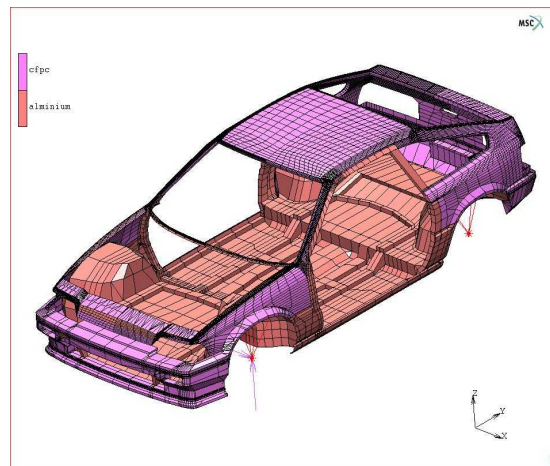


Fig.6 View of CF/PC(Vf40%)-aluminum hybrid model

5 . 軽量・安全車両の提案

前章の結果より、車両の軽量化には車両上部のねじり剛性向上が重要であることが分かった。しかしながら、現行車両のボディ構造では、さらに高効率の車両構造に変換することは困難である。そこで本章では、異方性を持つCFRPの特長を大きく生かした未来の車両構造及び、人に対する安全性も考慮した車両コンセプトを提案しその詳細設計も行う。

5.1 車両コンセプト 日本独特の道路構造を考えると歩行者に対する安全性をより重視する必要がある。また、より軽量化を推進するためにはCFRPの特性を大いに生かした構造の提案が必要である。

5.1.1 歩行者に優しい車 歩行者に対する安全性を考慮すると以下のことが提案できる。

A: ボンネット部への衝撃吸収材の導入 人をはねてしまった場合、その約 60%が頭部の裂傷が致命傷となっている。ボンネットへの直接の頭部への衝撃、人を跳ね飛ばしてしまう力の低減を考えると、ボンネット部に柔軟な素材を導入することは重要である。

B: フロント部低床化 人をはねてしまった際、車両前方に人を飛ばし車両の下敷きになることを防ぐため、また車両から受けるエネルギーの低減を考えると、人を車両上部に移動させることが必要である。

C: 車両軽量化による運動エネルギー削減 車両を軽量化することにより、車両の持つ運動エネルギーを軽減し、人をはねた際にも人間に伝わる運動エネルギーが減るようにする必要がある。

5.1.2 環境に優しい車 軽量化以外にも車両コン

セプトの観点から環境に対し以下のことが可能である。
D:乗車人数 現在、車両の平均乗車人数は1.7人である。車両サイズを小さくすることにより、車両の軽量化を促進させることを考え、今回提案する車両の乗車定員は二名とした。

5.1.3 CFRPの特徴を生かす構造

E:異方性特性 異方性の多用により従来のフレーム構造をノンフレーム構造に変化させることができると考える。フレームが少なくなることにより、部品点数の削減が進み工数の低減、作業時間の短縮が進み結果としてコストダウンにつながる。

この効果をより最大限に発揮させるために、フロアパネルにはサンドイッチ構造材を採用した。

5.2 車両形状 3800mm×1700mm×1100mmの直方体を基本とし、乗員の快適空間のため、1400mm×1400mm×1000mmの空間を保持し、フロント部にエンジンを積むことのできる十分な空間を確保することを必要条件とし、以下の設計に望んだ。

5.2.1 外部形状 車両上部丸み、車両前方の形状、車両後方の形状に関して、重量あたりのねじり剛性を比較し、最もねじり剛性効率のよい形状を考えた。

5.2.2 サンドイッチ材の導入 CFRPの特性を生かすために、底面にはフラットなパネルによる一体成型を考えた。表面材にはCF/PC(Vf40%)、コア材には今後プレス成型により大量生産の可能性がある口ハセルを採用した。車両の剛性比率をから検討した結果、積層構成は2-16-2mmを採用した。

5.2.3 必要最低限のフレームの採用 車両のねじり剛性を効率的に増やすため、また衝突による人命確保のため車両中央部にフレーム構造を採用した。材料には剛性のバランスを考えアルミニウムを採用した。

5.2.4 異方性の導入 更なる軽量化を促進させるため異方性を導入した。ここでは異方性の定め方を、現行車両のフレームの方向を参考にして図中矢印を強化するように異方性特性を決定した(Fig.7)。

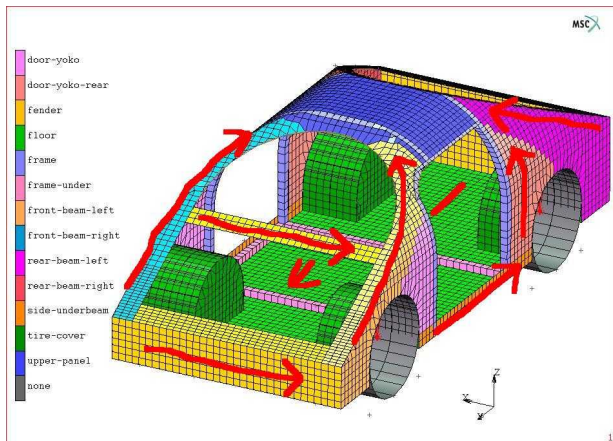


Fig.7 Direction of CF/PC(Vf40%) anisotropic material

その結果、異方性を導入する前と後では車両剛性が約1.4倍高くなった。

5.2.5 耐デント性設計 車両剛性に関与しない、ボンネット及びドアは主に耐デント性により設計される。この部位に対しては耐デント性に優位性があるCF/PC(Vf40%)を導入する。

5.3 軽量化・安全性評価

5.3.1 軽量化効果試算 得られた材料モデルを再び部位別に分け、感度ループ解析を四回行った結果、ボディは約50%軽量化された(Table8)。

Table 8 Body weight and weight reduction rate

	Body weight [kg]	Reduction ratio [%]
Steel-car	217	-
Safety-car	109	49.8%

5.3.2 安全性評価 ボンネットに薄いCF/PC(Vf40%)を導入したことで歩行者がボンネットに頭を打った場合の衝撃を抑えることに成功した。

ボンネットを模擬した700mm×1400mmの平板に、人間の頭部を模擬した直径30cmの球型の重り8kgを初期速度50km/hで衝突させ、その際に発生する頭部への最大荷重を頭への衝撃としたところ、荷重はスチール製ボンネットの約半分の最大荷重に納まった。

6. 総括

本研究により各軽量化材料の静的・動的特性が明らかになった。またそれらを乗用車に導入した場合の軽量化効果も試算できた。主な結果を以下に記す。

- ・ CF/PC(Vf40%)は降伏後、約6割程度の荷重を保持する、延性的な材料であることが分かった。
- ・ 車両上部は車両ねじり剛性に大きく寄与し、その部位へ軽量化材料の導入は比較的容易である。
- ・ 異方性を導入することにより、車両剛性は約1.4倍になる。
- ・ 対人安全性も十分に考慮した車両構造を提案した。また今後の課題も明らかになった。
- ・ 車両軽量化にはサンドイッチ材が欠かせないことから、安価なコア材の作成が必要である。
- ・ PCの他にPP・ABSなど安価で軽量の樹脂によるCFRTPの特性も調べる必要がある。

参考文献

- 1) Surface characterization and adhesion of carbon fibers to epoxy and polycarbonate, Jinyong Lee, Lawrence T. Drzal, International Journal of Adhesion & Adhesives 25 (2005)
- 2) 式田昌弘,自動車の強度,山海堂, 1989
- 3) 本田技術研究所 HP : <http://www.honda.co.jp/>