

17. 「学生安全技術デザインコンペティション」のための衝撃吸収構造の研究

(代表) 岡田 拓也 (工学部人間機械工学科 2年)
平野 栄治 (工学部人間機械工学科 4年)
水尾 大志 (工学部人間機械工学科 4年)
森尾 真名美 (工学部人間機械工学科 2年)
正木 健彦 (工学部機能機械工学科 4年)

指導教員

北山 哲士 (自然科学研究科システム創成科学専攻 講師)

1.1 研究背景

自動車における衝突事故の被害軽減を論じる場合、衝突が発生する前に、何らかの方法で回避すべきという視点で議論されることが多い。しかし、いかなる予測技術を持ってしても衝突などの事故を完璧に回避することは難しく、2003年の日本の交通事故による死者数は8000人近くにのぼっている。2003年の日本の交通事故による死者数は8000人近い。死亡事故の事故形態がどのようなものかを調査したところ、人対車輻31%、車輻相互47%、車輻単独22%となった[1]。この結果からわかるように、車輻相互による衝突事故が最も死亡事故になりやすい。また、車体損傷部位別の死者数の割合は表1のようであった。正面衝突による割合は72.9%に達する。これらの結果から、交通事故による死者数を減少させるには、車輻相互の正面衝突に対して被害軽減を図ることが最も効果的であると考えられる。

1.2 研究目的

現在、自動車はフロントボディの強度を客室部分よりも低くし、前面衝突時にはフロントボディを衝撃吸収構造としている。衝撃吸収構造が潰れることでエネルギーを吸収し、客室部分の変形を最小限に抑えることで乗員を保護している。現在、衝撃吸収構造に求められる性能として、1)エネルギー吸収量の増加、2)コンパティビリティ性、3)歩行者傷害軽減、4)エンジンスペースの確保等が挙げられる。この中で、1.1項で述べた車輻相互による前面衝突による被害を軽減するためには、エネルギー吸収量の増加とコンパティビリティ性の向上が重要と考えられる。従って、本研究ではエネルギー吸収量の増加とコンパティビリティ性の向上に注目する。衝撃吸収構造の材料および構造を実験変数とし、衝撃吸収構造の変形による衝突エネルギー吸収効果について実験的に検証する。ここで、本研究では衝撃吸収構造体に用いることができる材料や形状を、費用の視点と感性的視点(美観対効果)からその優劣を論じる。費用の視点は、用途や利用者(製造者か末端ユーザーかなど)によってその意味が大きく変わってくるので、質量対効果、体積対効果、加工性対効果に分けて考察する。また、衝撃吸収構造体の用いる材料は流通性と汎用性を考慮して、鉄系材料、アルミ系材料、プラスチック樹脂(複合材料)系材料とする。そして、それぞれの材料で衝撃吸収構造体を開発・実験をして、それらの利点と問題点を明らかにし、最も優れている材料と構造の組合せを提案する。

1.3 コンパティビリティ性

コンパティビリティ性は共存性と訳される。図1に前面衝突死亡事故の車体重量分布を示す。図1より大型車と小型車が衝突した際に、一般的に小型車の乗員の被害が大きくなることがわかる。コンパティビリティ性とはこの差をできるだけ小さくすることができれば、両者は共存できるという考え方である。被害に差が生じる原因として、(1)衝撃吸収構造であるフロントサイドメンバのすれ違いによるエネルギー吸収量の低下、(2)車輻の質量差による車体強度の差が挙げられる。したがって、これらの問題を解決することが、コンパティビリティ性を向上させるためには重要

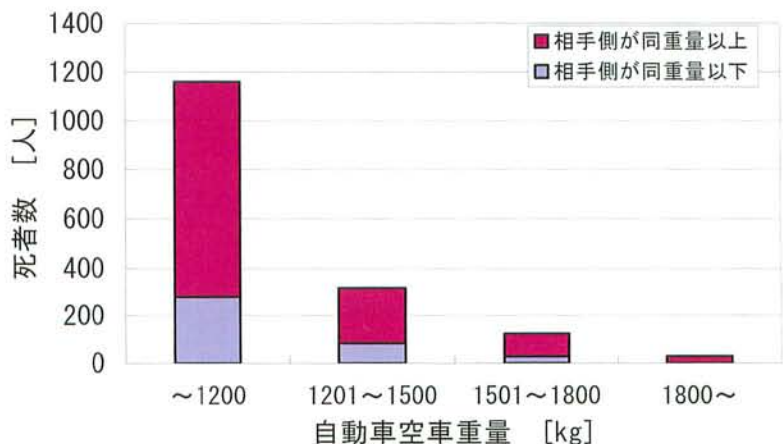


図1 前面衝突死亡事故の車体重量分布[2]
平成6~8年 空車重量別乗用車運転者死者数

となる。

現在、自動車の車体強度は、固定バリア衝突性能に代表されるように、等重量車との衝突を想定している。しかし、実際の死亡事故は重量の異なる自動車相互の衝突によって引き起される場合が多く、四輪乗車中の死亡事故の4割を占めている。一般的にバリア衝突による変形量を一定とすると、重量車の車体潰れ荷重は軽量車の車体潰れ荷重に比べて大きくなる。このような潰れ荷重が異なる自動車同士が衝突した場合、軽量車はバリア衝突時以上のエネルギー(重量車の運動エネルギー)を吸収する必要があるため、変形量が大きくなり搭乗者空間にまで変形が及んでしまう。重量の異なる自動車の衝突の際に両者の変形量を一定にするためには、軽量車の圧潰荷重を重量車の荷重と同等にする必要がある。しかし、圧潰荷重の増加に伴い、軽量車のバリア衝突時の減速度も高くなり乗員の傷害値が高くなるため、車体減速度を制御する必要がある。

2. 圧潰試験

2.1 試験方法

炭素鋼、アルミニウム合金および CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) 試験モデルを製作、万能試験機(図2)を用いた静的圧縮試験により荷重と変位を計測し、反力-変位曲線からエネルギー吸収量を調べる。万能試験機の諸元を表2に示す。炭素鋼及びアルミは、圧潰における速度依存性が低いので、静的試験によって、動的衝撃吸収性能を推測することができる。また、FRPも中谷らの研究[3]より、衝撃圧潰試験と静的圧潰試験による荷重の静動比(衝撃圧潰試験と静的圧潰試験から得られる平均荷重の比)が0.93から1.02の間であり、ひずみ速度依存性の影響が小さいことが確認されているため、炭素鋼とアルミニウムと同様に静的圧潰試験による検証を行った。

試験モデルは加工性や制作費、試験装置の大きさを考慮し、実際の車輛の約1/6である300kgの仮想車輛が衝突する場合を考えた。試験装置の都合上、衝突時の速度は7.0m/s(約25km/h)とし、エネルギー吸収量は7300Jとした。これは、Formula SAE参戦車輛に装着が義務付けられている衝撃吸収構造の概要に準じたものである。想定する一般車輛の重量を1800kg、衝撃吸収構造の大きさを基部幅1700mm、基部高800mm、潰れ長650mmと定義した場合、Formula SAE参戦車輛は重量、潰れ長がそれぞれ一般車輛の $1/1.82^3$ 、 $1/1.82$ となる。したがって、一般車輛の $1/1.82$ スケールモデルの基部幅、基部高を縮小したモデルと考える。基部幅、基部高を $1/1.82$ の寸法にすることは試験装置の都合上、困難であるため、潰れ長のみを $1/1.82$ の寸法としたスケールモデルで検証する。

2.2 試験モデル

炭素鋼、アルミニウムおよびCFRPの試験モデル外形寸法を図3に示す。炭素鋼は部材にSTKM11A(外径/肉厚が15.9mm/1.0mm, 13.8mm/1.0mm, 12.0mm/1.0mm, 10.0mm/1.0mmの4種類)を用いた鋼管スペースフレーム(以下SSF, 図3(a))とした。アルミは板厚2.0mmのA5052を用いたモノコック型(以下AM, 図3(b))とした。CFRPもアルミ同様にモノコック型(以下CFRPM, 図3(c))とし、VaRTM(Vacuum assisted Resin Transfer Modeling)法によって成形した。モノコック構造は様々な組合せが考えられ、それらを詳細に比較検証することは本稿の範囲を超える。よって、もっとも単純なモノコック構造=箱形を基本とし、成形性などを加味して形状を決定した。完成した試料の重量はSSF1500g, AM2900g, CFRPM840gとなった。



図2 試験装置

表2 万能試験機諸元

名称	万能試験機
メーカー	(株)島津製作所
型式	RH-30
容量	30, 15, 6, 3, 1.5 t

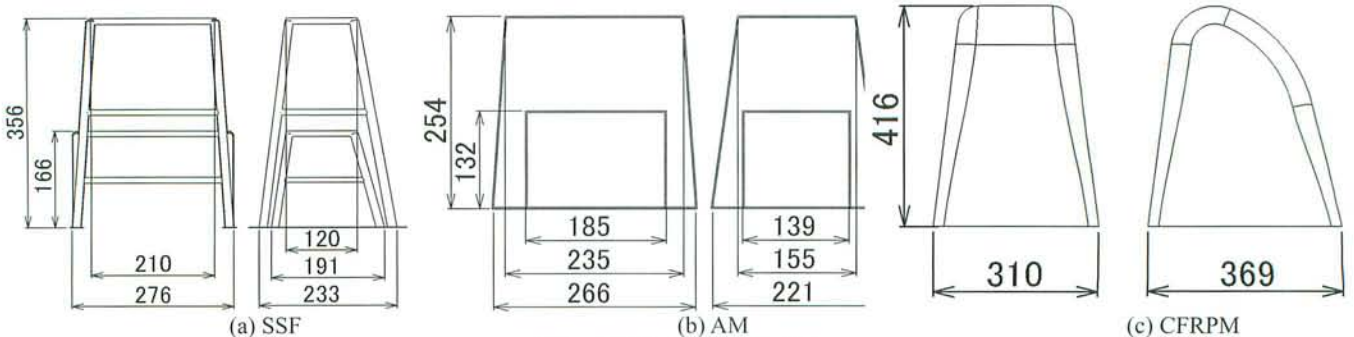


図3 試験モデル外形寸法

2.3 実験結果

万能試験機で得られた荷重-変位曲線を図4に示す。図4(a)はSSF、図4(b)はAM、図4(c)はCFRPMの場合

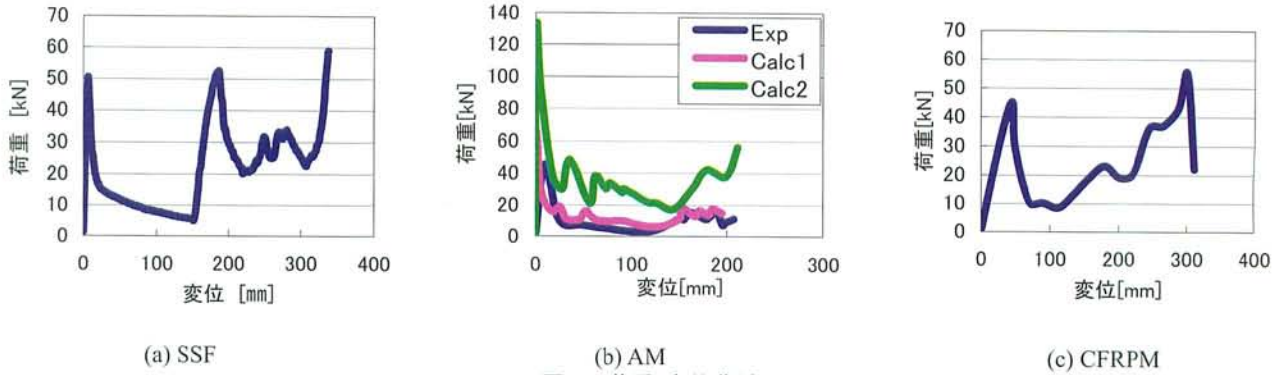


図4 荷重-変位曲線

である。

これらの曲線から求められたエネルギー吸収量、重量対効果、潰れ長対効果、平均減速加速度および最大減速加速度を表3に示す。この結果から、AMの場合、求められている7300Jのエネルギー吸収量を実現できなかったことがわかる。この原因として、AMの圧潰初期段階での溶接部の破断が、エネルギー吸収量の低下を招いたと考えられる。そこで、動的有限要素解析ソフトウェアANSYS LS-DYNAによって解析を行った。アルミノコックの実験値と解析値の結果を表4に示す。板厚・体積を一定とし、溶接部を再現しないモデルの解析を行った。しかし、溶接部の無い場合でも、エネルギー吸収量は2709Jと他の試験モデルに比べて低い値となった。解析によって体積一定で板厚の増加によって7300J以上を確保使用とした場合、アルミ板の板厚は3.5mmとなった。最大減速加速度は、同等のエネルギーを吸収するSSF、CFRPMの2倍以上となっていることから、乗員への傷害を考えると実用化は困難であると考えられる。また、SSFとCFRPMを比較した場合、CFRPMの方が最大減速加速度が小さく、平均減速加速度は高くなっている。荷重-変位曲線の荷重変動もSSFに比べて小さいことから、突発的な減速加速度の変化による乗員への傷害を防止できると考えられる。また、重量対効果、潰れ長対効果共に、CFRPMが最も高い性能を示した。以上の結果から、エネルギー吸収特性のみで比較した場合、3種の試験モデルの中でCFRPMが最も優れていると考えられる。

表3 衝撃吸収特性 (実験結果)

	SSF	AM	CFRPM
圧潰部重量 [g]	1500	2400	630
潰れ長 [mm]	338	210	311
エネルギー吸収量 [J]	7362	2042	7324
平均減速加速度 [G]	7.5	3.7	8.0
最大減速加速度 [G]	20.0	15.4	18.7
重量対効果 [g/J]	0.204	1.175	0.086
潰れ長対効果 [mm/J]	0.046	0.103	0.042

表4 衝撃吸収特性 (AM, 計算結果)

	AM (Exp)	AM (Calc1)	AM (Calc2)
重量 [g]	2400	2400	4200
潰れ長 [mm]	210	210	210
エネルギー吸収量 [J]	2042	2709	7317
平均減速加速度 [G]	3.7	4.4	11.8
最大減速加速度 [G]	15.4	22.1	44.3
重量対効果 [g/J]	1.175	0.886	0.574
潰れ長対効果 [mm/J]	0.103	0.078	0.029

表5 各試験モデルのフルスケールモデルに換算した場合の各効果

フルスケールモデル	質量対効果[kg/J]	潰れ長対効果[mm/J]
鋼管スペースフレーム	6.15×10^{-5}	4.18×10^{-3}
アルミノコック	3.54×10^{-4}	9.37×10^{-3}
CFRPモノコック	3.46×10^{-5}	3.87×10^{-3}

表6 各材料の単位質量当りの材料費、加工費および製造費[4][5]

	材料費 [¥/kg]	加工費 [¥/kg]	製造費 [¥/kg]
SSF	30	40	14
AM	200	200	480
CFRPM	830	705	132

3. 費用対効果

大量生産品として実用化される場合、低価格であることが求められる。しかし、低価格であればどのようなものでも良い訳ではなく、製品としての価値を向上させる性能が求められる。したがって、費用対効果を考える場合、製品の性能が製造費用に対して満足するものなのかを考えることが重要である。本研究では、衝撃吸収構造の製造費用と、衝撃吸収構造の小型化に伴う市場価格の向上に注目して費用対効果を検

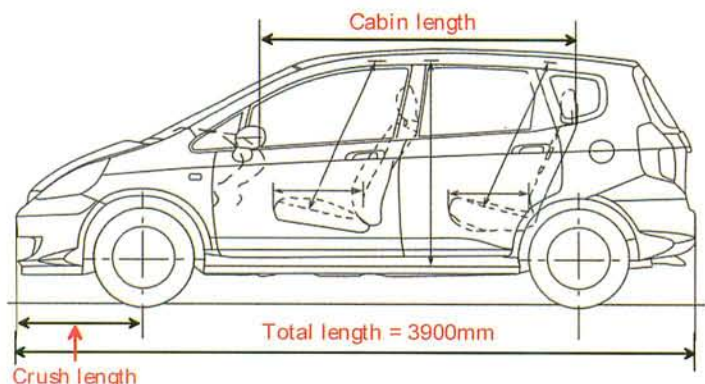


図5 各寸法概要

証する。また、検証の際には圧潰試験より得られた質量、潰れ長の各効果を相似則によってフルスケールモデルに換算した値を用いる(表5)。算出の際には相似則に基づき質量を1.82³倍、寸法を1.82倍とした。

3.1 製造費用

製造費用の算出は、質量対効果に単位質量当りの材料費・加工費を乗じた値とした。各材質の単位質量当りの材料費・加工費を表6に示す。CFRPの材料費は炭素繊維の単位質量当りの価格を2000(円/kg)、樹脂を200(円/kg)、炭素繊維含有率を60%と仮定して算出した。

これらの値にフルスケールモデルの質量対効果を乗じて算出した、単位エネルギー吸収量当りの製造費用を表6に示す。表6よりSSFが最も製造費用が安いことがわかる。この要因として、炭素鋼の材料費、加工費が安いことが挙げられる。また、炭素鋼とCFRPの材料費、加工費の合計の差が1465(円/kg)であるのに対し、SSFとCFRPMの差は118(円/J)であった。これはCFRPMの質量対エネルギー吸収効果が、他の試験モデルと比べて高いことが要因である。したがって、今後CFRPの材料費、加工費が低減した場合、CFRPMの製造費用は更に低減し、SSFとの差が小さくなると考えられる。

3.2 衝撃吸収構造の小型化に伴う市場価格の向上

衝撃吸収構造の小型化に伴って室内空間が拡大し、ユーティリティ性が向上する。ユーティリティ性は自動車の製品価値を決定する上で重要な項目であり、ユーティリティ性の向上に伴って製品の市場価格も向上すると考えられる。本研究では、特にユーティリティ性が重要視されるコンパクトカーを例に、衝撃吸収構造の小型化に伴う市場価格の向上について検証する。

現在、市販されている自動車に対して図5に示すように、それぞれ潰れ長を車輪前端から前輪車軸まで、室内全長をダッシュボードから後部座席のヘッドレストまでと定義し、各寸法を計測した。調査対象とした車種を表7に示す。計測時には、各自動車メーカーより公表されている各車種の三面図を参考にした。各寸法は車輪全長の影響を受け、車輪全長が大きくなるに伴い各寸法も大きくなるため、同じボディタイプでも車種によって寸法にバラつきが生じた。したがって、潰れ長と室内全長の車輪全長に占める割合で評価することで、車輪全長による影響を無くした。潰れ長、室内全長を車輪全長で除した値を散布図でプロットし、近似直線を求めた結果を図6に示す。図6より潰れ長の車輪全長に占める割合が大きくなるにつれて、室内全長の割合が小さくなるのが分かる。

続いて、室内空間と市場価格の関係について調査した。市場価格については同一車種でもグレードによって価格が異なり、グレードの高いものは安全装置やオーディオ機能等の付加価値による価格への影響が大きく、単純に室内空間と市場価格の関係を調査するのは難しい。よって、本研究では各車種とも、付加価値による価格への影響が少ない最低グレードの価格を用いた。室内空間は前項で定義した室内全長として考え、市場価格と室内全長の関係を調査した結果を図7に示す。図7より室内空間が拡大するに伴い、市場価格も高くなっていることが分かる。

以上の調査より得られた、潰れ長と室内全長、室内全長と市場価格の関係式はそれぞれ式(1)、(2)となる。式(1)、(2)より、エネルギー吸収部と予想市場価格の関係式は式(3)で表せ、車輪全長を3900mmと仮定した場合、両項目の関係は図8のようになる。

$$L_{CI} = -1.499 L_{CV} + 0.773 L_T \quad (1)$$

$$P_M = 0.0613 L_{CI} - 12.615 \quad (2)$$

$$P_P = -0.092 L_{CV} + 0.047 L_T - 12.165 \quad (3)$$

表7 調査対象車種

車種	車輪全長 [mm]	潰れ長 [mm]	室内全長 [mm]	市場価格 [万円]
フィット	3845	720	1835	112.4
ラクティス	3955	693	1920	138.6
ポルテ	3990	725	2145	138.6
イスト	3925	822	1805	132.3
マーチ	3725	700	1875	108.5
ティーダ	4205	826	2035	146.0
ノート	3990	779	1835	128.7
キューブ	3730	683	1870	134.2

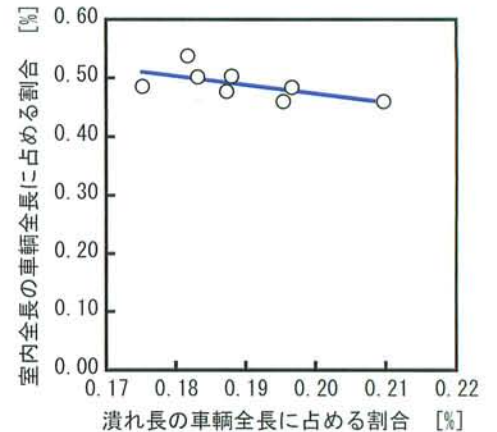


図6 潰れ長、室内全長、車輪全長の関係

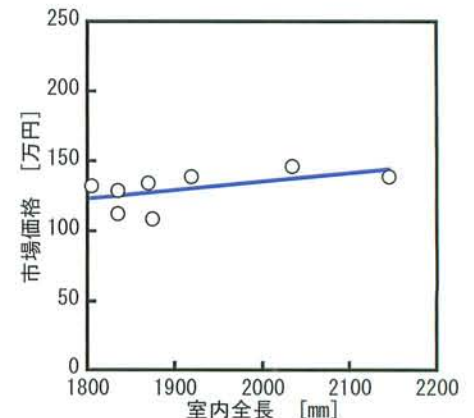


図7 室内全長と市場価格

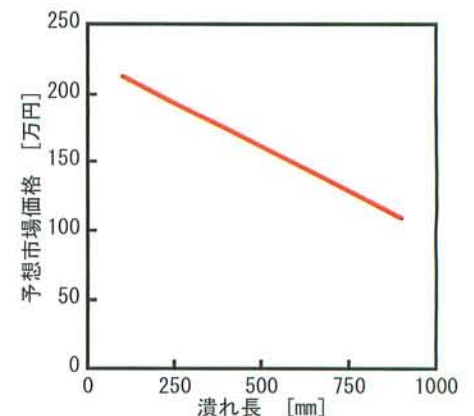


図8 潰れ長と予想市場価格

L_{CA}	Cabin length [mm]
L_{CU}	Crush length [mm]
L_T	Total length [mm]
P_M	Market price [10k¥]
P_P	Predicted price [10k¥]

表 8 衝撃吸収構造による予想市場価格の減少額

	予想市場価格の減少額[円/kJ]
鋼管スペースフレーム	3846
アルミモノコック	8620
CFRPモノコック	3560

図 8 より潰れ長の増加に伴って、予想市場価格が低下していることが分かる。これは、潰れ長の増加に伴う室内空間の減少によって、ユーティリティ性が低下したことで商品としての価値が下がり、市場価格も低下したと考えられる。各試験モデルの単位エネルギー吸収量当りの潰れ長による市場価格の減少額を表 8 に示す。表 8 より衝撃吸収構造を鋼管スペースフレームから CFRP モノコックに変えることで、単位エネルギー吸収量当たり 286 円高く販売することができる。

以上より衝撃吸収構造に CFRP モノコックを用いることは、鋼管スペースフレームに比べて製造費用は高くなるが、市場価格を高く設定することが可能となるため、高額な製造費用を十分に補える性能を有していると考えられる。

4. CFRP 製造費用の削減

3 項で述べたように、CFRP の導入によって製造費用は高くなるが、それを補う高い性能を有していることから、実用化は十分に可能であると考えられる。しかし、未だに実用化が進んでいないのは、やはり高額な設備投資や材料費による製造費用の高さが大きな障害となっているためと考えられる。したがって、CFRP を自動車分野で実用化するには、製造費用の削減が重要となる。CFRP 製品の製造価格構成では、材料費及び成形加工費が大きな割合を占めている。よって、材料費と成形加工費の削減が、CFRP 製品のコスト削減に有効であると考えられる。

4.1. 材料費の削減

3 項で述べたように、CFRP の材料費は他の数倍必要である。しかし、材料費は鋼やアルミのように CFRP が普及すれば、低価格化すると考えられる。図 9 は過去 24 年間の炭素繊維の需要量と価格の推移を表した図である[6]。需要量が増加するに伴って、価格は急激に減少している。また、安定した価格を実現するためには、需要に対して安定した供給が不可欠となる。図 9 のように需要量の増加に伴って安定して価格が減少していることは、現在の炭素繊維供給体制が十分に機能している事を表している。また、炭素繊維の生産各社も将来的な需要の更なる拡大に備え、生産体制を強化しており、これまで航空機や一部の高級車等にものみ使用されていた CFRP が、今後大衆化が進み生産の合理化等によって更なる材料費の削減が期待される。

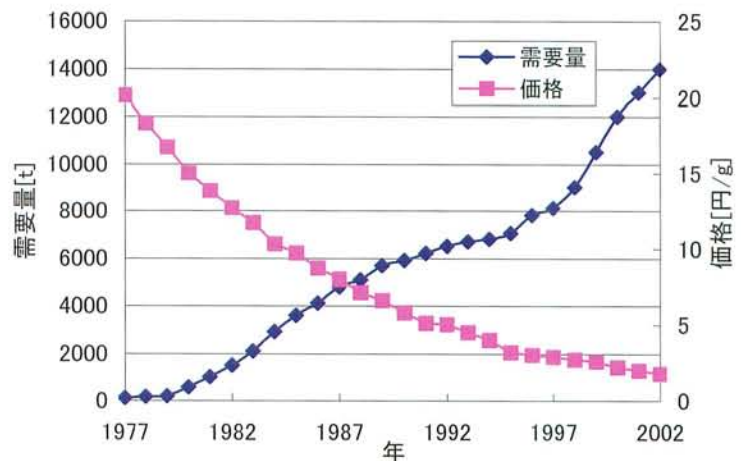


図 9 炭素繊維の需要・価格の推移[6]

アメリカの Zoltek 社では将来的に炭素繊維の価格が 1400 円/kg まで削減されると見込んでいる。

4.2 成形加工費の削減

CFRP は加工圧や温度等の各種条件が鉄やアルミニウムに比べて低いため、成形型の費用や加工機械の動力費が他の材料に比べて高くなるとは考えにくい。したがって、成形加工費の削減方法としては、設備投資の削減が効果的と考えられる。これまで、CFRP の実用化において炭素繊維含有率の高い高強度のものを製造する場合、オートクレーブを用いたオートクレーブ成形法が主流であった。しかし、自動車部品を成形する大規模なオートクレーブになると、設備投資額は数億円となるため、オートクレーブを用いない新たな CFRP 成形法が注目されている。ここではその一部を取り上げ、航空機分野等で研究が盛んに行われ、実用化が期待される VaRTM 法について述べる。

VaRTM 法とは、炭素繊維で組んだ構造体を、バキュームバックで包み、真空ポンプで真空引きして樹脂を含浸させ、60~80 度で硬化、120 度で後硬化させる成形法である。プレハブ小屋のような加熱室で温風器などを使っての成形が可能で、オートクレーブのように数億円単位の高額な設備投資を必要とせず、その設備投資額は 2000 万円程度で済む。また、オートクレーブのようなプリプレグを用いないため、材料費も低減できる。

そのため、製品のコストはオートクレーブ成形法に比べ2割低減できる。しかしながら、VaRTM法で成形したCFRPは従来のRTM成形法とは異なりオートクレーブ成形法と同等の強度を有した製品の製造が可能であり、費用対効果の面で非常に優れている。

5. まとめ

1. 試験モデルを用いたの圧潰試験では、CFRPモノコックが質量対効果、潰れ長効果で最も高い性能を有することが確認できた。また、同等のエネルギーを吸収する場合、3種の試験モデルの中でCFRPモノコックが最大減速加速度が最も低いため、乗員への傷害を軽減できると考えられる。
2. 費用対効果による評価を行った場合、CFRPモノコックは他の試験モデルと比べて製造費用の増額分よりも高く市場価格を設定できるため製造費用の高額化を十分に補うことが可能と考えられる。
3. 実用化の為に製造費用の削減が重要となるが、需要拡大に伴う材料費の低減、VaRTM法による成形加工費の低減により、実用化は十分に可能と考えられる。

以上より、金沢大学セーフティーR&DではVaRTM法によるCFRPモノコックを車輛相互の全面衝突の被害を軽減するための安全技術として提案する。

参考文献

- [1] 自動車技術ハンドブック(2)環境・安全編, 社団法人自動車技術会, 2005
- [2] 自動車の基本計画とデザイン, 山海堂, 2002
- [3] 中谷有, 横山敦士, 高性能FRP製クラッシュボックスの開発, 自動車研究, Vol. 26, No. 10, pp. 571-574, 2004.
- [4] NEDOプロジェクト『自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発』中間評価報告書
<http://www.nedo.go.jp/iinkai/hyouka/houkoku/17h/chukan/02.pdf>
- [5] 2006 Formula SAE Rules, The Society of Automotive Engineers, 2005.
- [6] 社団法人日本自動車工業会 HP JAMAGAZINE2006年3月号
<http://www.jama.or.jp/lib/jamagazine/200603/06.html>