

# 軽量・安全を実現する CFRTP 乗用車ボンネットの設計

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  
66348 志田 龍亮 指導教員 高橋 淳

## 1. 序論

### 1.1. 車両を取り巻く問題

近年、地球規模での環境・エネルギー問題はますます深刻化しており、特に全石油消費の半数近くを占める自動車輸送に対する省エネ技術のニーズが高まっている。さらに今後は BRICs 諸国を始めとした発展途上国においてもモータリゼーションの勃発が予測されるため、自動車の環境・省エネ技術の確立と適用は急務と言える。

また環境・エネルギー問題と並び自動車を引き起こす社会問題として長く問題視されているのが、交通事故による人命の損失である。特に国土が狭く道路の密度が高い日本においては、歩行者の死亡率が他の先進諸国と比較して高く、歩行者安全(Pedestrian Safety)技術の更なる向上が望まれる。今後は高齢化社会の進展により、高齢者ドライバーの増加も見込まれていることから、これからの車両においては省エネルギー性だけでなく、乗員や歩行者を守る安全性を持ち合わせる必要がある。

### 1.2. CFRP による車両軽量化の現状

自動車における効果的な省エネルギー技術の一つとして車体軽量化による燃費向上が挙げられる。特に比強度・比剛性に優れた CFRP(炭素繊維強化プラスチック)はその効果が大きいことから、次世代の代替材料として非常に注目されている。

しかしながら、CFRP は現在のところ、コスト・量産性・加工性・リサイクル性等に問題があることから、量産車への本格的な適用には至っていない。各種先行研究においてはそれらの欠点を解決すべく、加工性・リサイクル性に富む CFRTP(熱可塑性 CFRP)の開発・適用が検討されてきたが、その評価は、軽量性や機械特性の向上による省エネルギー効果を主な評価項目とし、自動車のもう一つの社会問題である「安全性」という視点に対しては余り注目して来なかった。

よって本研究では、今まであまり検討が為されて来なかった CFRTP の安全性に着目することで、環境と安全の両方のニーズを満たす自動車用 CFRTP 部材の開発とその評価を行うことを目的とした。具体的には現在、歩行者衝突の際に最も重要となる部材であるボンネットに焦点を当て、実験及び FEM 解析を通して軽量・安全な CFRTP 製ボンネットの提案を行う。CFRTP の対人安全性が明らかになれば、それは CFRTP の新たな魅力の発見を意味し、車両への適用可能性が高まると共に、CFRTP 自体の適用フロンティアの拡大へと繋がるものと考えられる。

## 2. 既存 Steel 製ボンネットにおける FEM 解析

### 2.1. 歩行者頭部保護基準

CFRTP 製ボンネットの提案に当たって、まず既存 Steel 製ボンネットの問題点を明らかにする必要がある。本研究では、現在自動車の歩行者安全性の基準となっている、国土交通省規定の歩行者頭部保護基準の衝突試験を

FEM(Finite Element Method) によって再現することで、ボンネットの安全性を評価した。

歩行者頭部保護基準とは人間の頭部ダミーを一定の条件下において、ボンネットに向けて衝突させることで、車両の対人安全性の評価を行うというものである。

頭部傷害の指標は、式(1)に示される頭部インパクトが受ける合成加速度の関数 HIC (Head Injury Criterion)を用いて表されており、本研究においても当該基準をもとに FEM 解析を行い、Steel 製ボンネットの評価を行った。なお、本研究の FEM 解析は全て、プリポストには ABAQUS / CAE、ソルバには ABAQUS / Explicit または ABAQUS / Implicit を用いている。

$$HIC = \left[ \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \frac{a}{9.8} dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (1)$$

a: 三軸合成加速度(m/s<sup>2</sup>)  
t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>: t<sub>2</sub> - t<sub>1</sub> 15msec

### 2.2. 頭部インパクト FE モデルの設計

歩行者頭部保護基準に沿った衝突解析を行うに当たり、まずは FE モデルの精密な検討を行う必要がある。衝突物である歩行者頭部インパクトの仕様については、国土交通省及び IHRA によって質量・直径・慣性モーメントなどが詳細に規定されており、本研究で用いるモデルもこれらを満足するものでなければならない。

その各項目の中でも、最も重要とされているのが、自由落下試験における最大合成加速度である。歩行者頭部インパクトの FE モデルに関する検討は既に幾つかの論文において研究されているが、そのほとんどが HIC に直結する自由落下試験における最大合成加速度に焦点を当てており、衝突解析を正確に行うためにはこの基準を十分に満足する必要がある。

本研究では各種公開資料をもとに、上記基準を満足させる、頭部インパクト FE モデルの設計を試みた。Fig.1 に作成した FE モデルを示す。頭部インパクトの構成部材は、塩化ビニルにて構成される Skin 部と、主にアルミニウムにて構成される Core 部とに大別される。予備検討の結果、Skin 部には粘弾性体、Core 部には剛体という物性を与えることが最も計算効率及び正確性が高いことが明らかとなったため、以上の条件にて自由落下シミュレーションを行った。Fig.2 及び Table1 にその結果を示す。

Fig.2 は本研究によって行われた FEM 解析と、実際の自由落下試験の時間 - 加速度曲線を比較したものである。曲線の外形は良く一致しており、算出された HIC 及び最大合成加速度も ± 5 % 程度に収まっていることから、頭部インパクト FE モデルは良好な精度にてモデリング出来たものと考えられる。



Fig. 1 Head-form impactor FE model

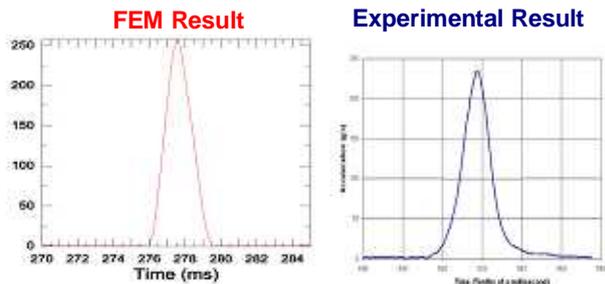


Fig. 2 Comparison of time-acceleration curve

Table1 FEM and experimental result in biofidelity test

	FEM result	Experimental result	% Error
HIC	925.7	875	-5.8%
Peak acceleration (G)	248.4	255	2.6%

### 2.3. 乗用車ボンネット FE モデルの作成

次に被衝突物である乗用車ボンネットの FE モデルの作成を行った。ボンネットは一般に曲率と角度を持った複雑な形状をしており、裏面のリブ配置や各部材の板厚も衝突解析において直接的に影響する因子であることから、自力で FE モデルを開発・評価することは困難であるだけでなく再現性に乏しい。

よって本研究では The George Washington University の研究機関である National Crash Analysis Center にて無料公開されている FE モデルの中から一般的なセダンタイプの車種を選定し、頭部衝突の際に影響すると思われるパーツを抽出・修正を行うことで、ボンネット FE モデルを作成する手法を用いた。

また、その際にはボンネット部分だけではなく、サイドフレームやバンパなど衝突時に干渉する周辺部材や、衝突時、ボンネットの過度の変位によって接触する可能性のあるエンジンルーム内機器等も位置情報を保ったまま抽出することで再現性の上昇に努めた。材料物性・要素特性等は Steel 製モデルのものが Default で設定されていたため、本研究においてはその値を採用した。Fig.3 に頭部衝突解析において使用した解析モデルを示す。

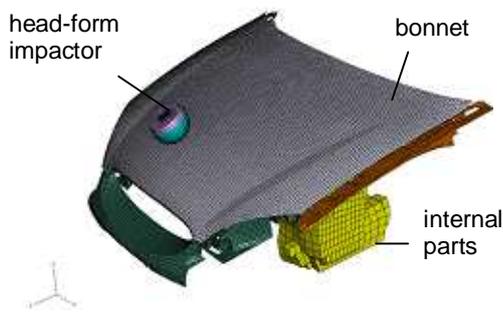


Fig. 3 Head-form impact test FE model

### 2.4. ボンネット中央部における解析結果

Fig.4 及び Fig.5 にボンネット中央部に頭部インパクトを衝突させた際の FEM 解析の結果を示す。ボンネットは衝突点で大きくたわみ、裏面の補強リブの形状を伝う形で応力伝播が起こっている。応力の最大値は衝突点における 313(MPa)であり、ボンネット表面部の降伏応力であ

る 300(MPa)に達していることから、衝突部を中心とした局所的な塑性変形が確認された。

安全性の基準である HIC 及び最大合成加速度はそれぞれ、821.4, 147.8(G)となった。実車試験による結果は車種によって異なるものの、ボンネット中央部における HIC は概ね 600~1000 の範囲、最大合成加速度は 100~150(G)の範囲のものが多く、頭部インパクト衝突試験においても現象の再現性には問題がないものと考えられる。

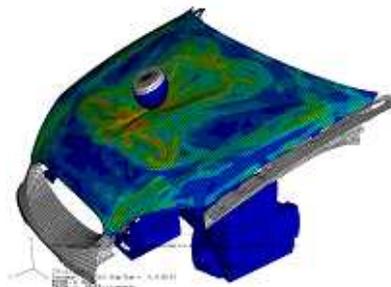


Fig. 4 FEM result in steel bonnet (Contour: Mises stress)

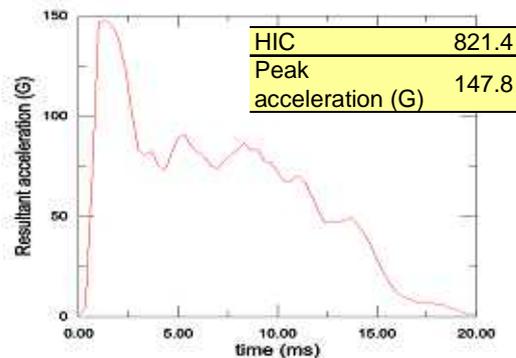


Fig. 5 Time - acceleration curve of head-form impactor

### 2.5. 危険部位における解析結果

実車試験による報告によると、周辺部材の影響が大きい端部においては HIC が高くなることが指摘されていることから、本研究の FEM 解析においてもその検証を行った。また、車種によってはエンジン類とボンネットの間隙(クリアランス)が非常に小さいものがあるため、エンジンルーム内の初期位置をボンネット裏面近傍にまで近づけ、衝突によってボンネット裏面がエンジンに接触した際の影響も併せて確認した。

Table2 にその結果を示す。HIC・最大合成加速度共に中央部衝突における結果よりも大きくなっており、危険部位の存在が示唆された。特にエンジンとの接触時における HIC は、中央部の衝突時の値の 5 倍以上となっている。一般に HIC と死亡確率には密接な関係があるとされ、HIC=1000 のときの死亡確率が 7%なのに対して、HIC 3500 のときには死亡確率は 100%となっており、エンジン部との接触を防ぐためのクリアランスの重要性が示される結果となった。

Table2 HIC and peak acceleration in dangerous point

	Impact at bonnet edge	Contact with internal parts
HIC	1266.9	4835.1
Peak acceleration (G)	254.8	349.9

### 3. 平板衝突モデルによる感度解析

#### 3.1. 対人安全性の再定義

従来、材料の安全性はシャルピー衝撃試験等によって計測される衝撃吸収エネルギーという項目によって評価されてきたが、衝突対人安全性と材料の衝撃吸収エネルギーは同値ではない。対人衝突を考えた場合、重要となるのは「いかに材料が壊れないか」ではなく「いかに人にダメージを与えないか」であり、例えば衝突時には全壊したとしても人体に与えるダメージが少ない材料・構造が本研究で定義する「安全性」である。

よって本研究では、どのような材料・構造が上記で定義した安全性が高いのかを、単純平板モデルにおける感度解析を用いて検証した。Fig.6 にモデルの外観を示す。

端部を剛体との接触によって支えられた平板の中央に、初速度を持った剛体の球を衝突させる。このモデルに対して平板の材料物性・構造・形状を変化させていき、球の中心点にて観察される HIC、最大合成加速度及び衝突点最大変位への影響を調べた。

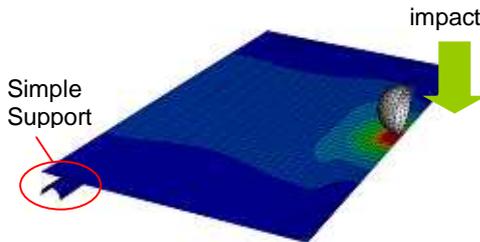


Fig. 6 Simple plane impact FE model

#### 3.2. 材料物性による感度解析結果

材料物性の感度解析パラメータには、材料の基礎的な機械特性である、ヤング率、降伏応力、密度、降伏後挙動の四つを選定した。降伏後挙動については完全弾塑性体、加工硬化、加工軟化、破断後一定荷重保持、脆性破壊の五種類を設定し、評価項目に与える影響について検証を行った。

その結果、ヤング率及び降伏応力が最も安全性に対する感度が高いことが明らかとなった。Fig.7 にヤング率及び降伏応力における感度解析結果を示す。HIC はヤング率・降伏応力の上昇と共に増大する傾向にあり、特に降伏なしの完全弾塑性体では線形に増加していることが分かる。よってボンネットの安全性向上には、機能性を損なわない程度に全体剛性を下げることが材料代替の一つの指針となる。

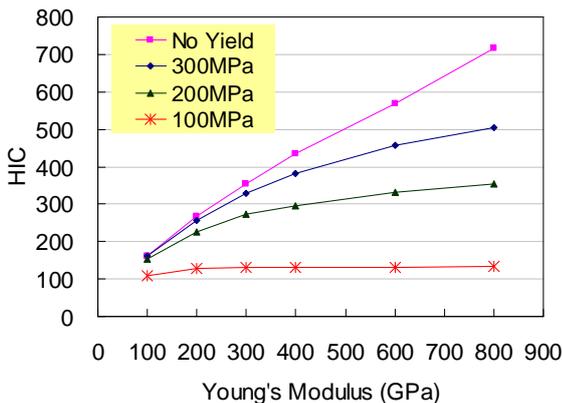


Fig. 7 Results of sensitivity analysis in Young's modulus and yield stress

#### 3.3. 形状・構造による感度解析結果

構造・形状による感度解析パラメータには、板厚、曲率、リブ構造の三種類を選定した。リブ構造においては、標準的なハット型に加え、衝撃吸収において効率的とされている波型リブも対象とし、リブなしの平板モデルと曲げ剛性を揃えた条件にて衝突解析を行った。その際には表面部とリブ部の交差部分と、通常部分とで衝突点を変えて解析を行うことでリブによる局所的な剛性の違いを確認した。

感度解析の結果、同曲げ剛性における衝突安全性はリブ構造の方が平板モデルよりも良好な結果となった。リブ構造の交差部分における HIC は、確かに通常部分よりも高くなり局所的に剛性が上昇していると言えるが、それでも平板構造における HIC より低い。

さらに二種類のリブ構造でも比較したところ、波型リブにおける重量は 10%程度ハット型リブより重くなるものの、衝突時危険部位と通常部位との HIC の差が小さくなっており、本研究の観点からすればより望ましい構造であると言える。

また、板厚においてはその増大とともに HIC は上昇し、曲率においては増大と共に HIC は減少する傾向が確認された。特に板厚は全体剛性に三乗で影響するためヤング率の場合と比較しても感度が高い因子であることが確認された。

#### 3.4. CFRTP 製ボンネットの開発指針

以上の感度解析の結果より CFRTP 製ボンネットの開発指針を設定した。まず、HIC 及び最大合成加速度の減少に関しては前述のようにヤング率・降伏応力の減少が有効である。また、ボンネットには耐デント性と呼ばれる塑性変形のしにくさを表す指標があるが、その向上には弾性域による衝撃吸収エネルギー領域を広げる、降伏歪みの増大が有効であると考えられる。

しかしながら、低ヤング率で構成されたボンネットは衝撃に対して大きくたわむことが考えられ、前述のエンジン部への衝突の危険性が増すこととなる。よって、材料物性の変更によってたわみやすくなったボンネットを、構造で補うことが設計に望まれる基本スタンスとなる。

感度解析による結果を基にすれば、視界を妨げない程度に曲率を設けクリアランスの拡大を試みると共に、効率的なリブ配置と板厚の変化によってフード剛性の均一化・最適化を図ることによって、安全性は大きく上昇するものと考えられる。Fig.3-8 にそれらをまとめた CFRTP 製ボンネットの開発指針の概念図を示す。

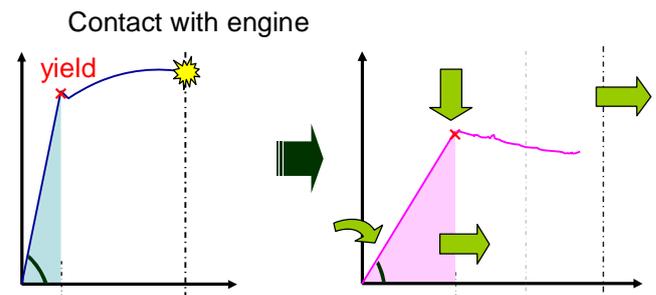


Fig. 8 Conceptual design for developing CFRTP bonnet

## 4. CFRTF パネル材の開発

### 4.1. 開発指針

上記に示した安全性の指針である， 適度なヤング率， 大きな弾性変形域（降伏ひずみ）， 優れた衝撃吸収能力，そして軽量性の指針である 低比重，の四点に主に留意し，CFRTF パネル材の開発を行い，力学特性評価を行った．それにより，CFRTF における安全性及び軽量性の達成度評価を行うと共に，次章において行う CFRTF 製ボンネットの設計時のFEM 解析に用いる物性値を得ることが本実験の目的である．

### 4.2. 材料成形

炭素繊維にはパネル材において必要な擬似等方性を確保するため 3K クロス材を，熱可塑性樹脂には繊維への含浸が良く，靱性に優れた PC(ポリカーボネート)を用いた，CF/PC を基に本研究での材料比較を行う．

試験片は，CF/PC 積層材，ポイド率の異なる三種類の PC コアサンドイッチ材，アラミドハニカムコアサンドイッチ材，及び現在ボンネットに使用されている冷延鋼板の計六種類を用意し，静的・動的三点曲げ試験において比較を行った．

### 4.3. 静的・動的三点曲げ実験結果

実験結果を以下 Fig.9~12 に示す．冷延鋼板の曲げ弾性率は静的において 164GPa，動的において 156GPa と他の試験片に比べ著しく高かったため，グラフ上では割愛した．Fig.11 には鉄の場合は静的荷重時における降伏応力も示した．しかしながら，応力 - ひずみ線図からは明確な降伏点は観察されなかったため，0.2%耐力を便宜的な降伏応力として用いている．

また，各種試験片は，積層板，サンドイッチ材高ポイド率，中ポイド率，ポイドなし，アラミドハニカムコア，鋼板の順に 8ply, sand1, sand2, sand3, honey, steel と表記する．

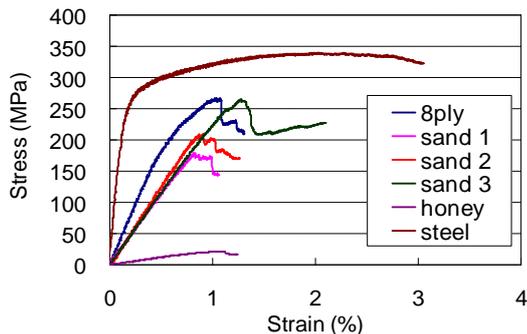


Fig. 9 Stress-strain curve

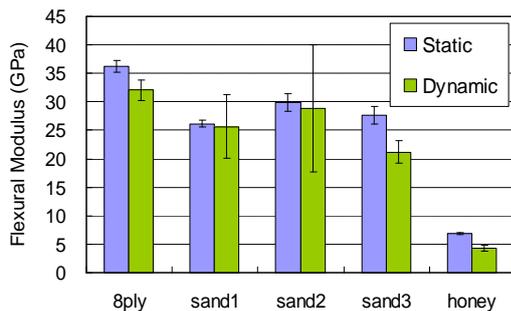


Fig. 10 Flexural modulus

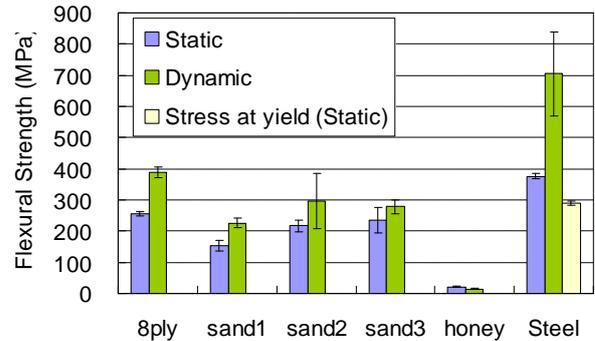


Fig. 11 Flexural strength

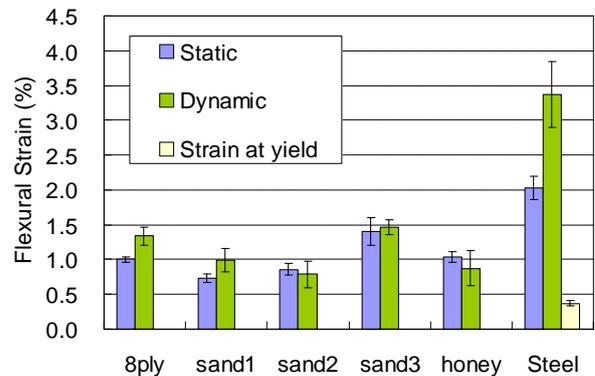


Fig. 12 Flexural strain

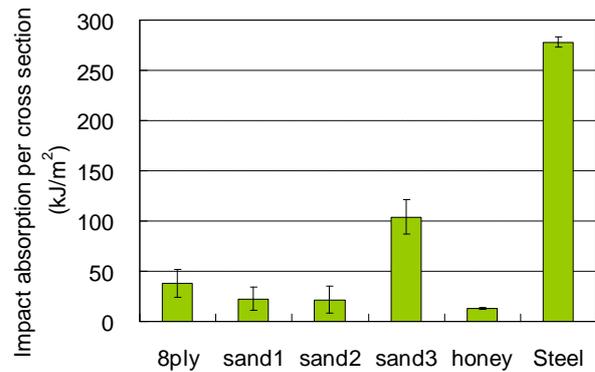


Fig. 13 Impact absorption per cross section

### 4.4. 考察

本研究にて定義した安全性指標の観点から見た場合，ポイドのない Sand3 の機械特性は，適度なヤング率，曲げ歪み・曲げ強度が大きい，そして大きな衝撃吸収エネルギー等，目標とした材料物性の要件をほぼ満たしており理想的な材料であると言える．

また，Sand3 の成形方法である，凹凸の鋳型による高圧成形は，サンドイッチ材の PC コアがより密になり性能向上を促すことが明らかになったのも，本研究によって得られた知見の一つであると言える．

歪速度依存性に関しては，鋼板と異なり，CF/PC は動的三点曲げにおける結果が静的三点曲げにおける試験結果に近く，歪速度依存性がないことが示されたため，CFRTF 製ボンネットの FEM 解析においては偏差の小さい静的曲げ試験における結果を用いることにした．

## 5. CFRTP 製乗用車ボンネットの機能性評価

### 5.1. ボンネットの機能要素

前章の実験で得られた物性値をもとにボンネットの材料を変え FEM 解析を行うことで、CFRTP 製ボンネットと既存モデルの比較を行い、その有効性を評価する。

本研究ではボンネットの機能要素を「健全性・安全性・軽量性」の3つに大別し、CFRTP 製ボンネットが Table3 に示されるような基準を満たすかどうかについて検証を行った。

Table3 Specifications for CFRTP bonnet

健全性	4G における最低剛性の確保
	耐デント性の確保
安全性	HIC 及び最大合成加速度の減少
	衝突時クリアランスの確保
軽量性	既存 Steel ボンネットよりも軽量化

### 5.2. 健全性・軽量性評価

健全性評価にあたっては、まず重力加速度をモデル全体にかけ、既存 Steel 製ボンネットにおける最大変位を測定する。その変位と同等になるような CFRTP 製ボンネットの板厚を求め、それを以て最低剛性の確保と設定した。静解析の結果、Steel 製ボンネットにおいて用いられている板厚に設定しても、CFRTP 製の変位はほぼ変わらなかったため板厚変更は行わず、最低剛性は確保できていると判断した。

耐デント性比較においては、2cm の辺を持つ立方体の剛体をモデリングして小石と見なし、ボンネットに衝突させたときの相当塑性歪み分布において評価した。その結果、Steel 製ボンネットにおいては衝突点を中心に塑性変形が起こったのに対し、CFRTP 製ボンネットは材料の持つ大きな曲げ歪みが有効に働き、塑性変形を起こさなかった。以上2つの結果により CFRTP 製ボンネットの健全性基準は満足したことになる。

このとき、ボンネットの重量は 3.2kg と一般的な Steel 製ボンネットの 1/4 程度となっており、軽量性の基準も大きく満足した結果となった。

### 5.3. 安全性評価

二章にて行った FEM 解析と同条件下で、CFRTP 製ボンネットにおいても頭部インパクト衝突解析を行った。

結果を Fig.14 及び Table4 に示す。CFRTP 製ボンネットの HIC は既存 Steel 製ボンネットに比べ 1/3、最大合成加速度においても約 1/2 となっており、安全性が大きく上昇していることが分かる。時間 - 加速度曲線に注目すると、鉄鋼が短い時間内に加速度が急上昇しているのに対し、CFRTP は緩やかに時間をかけた理想的な曲線を描いており、本研究の目的とする CFRTP 製ボンネットによる安全性の向上、及びそのポテンシャルが示された。

しかしながら、端部における衝突では、ボンネットの剛性の不足から運動エネルギーを吸収しきれないままフレームに接触したため、CFRTP 製ボンネットにおける HIC は既存 Steel モデルより大きくなり、課題が残る結果となった。本モデルにおけるボンネットとフェンダとの距離は 2cm 程度しかなく、端部領域においてはフレーム部への接触を前提としたボンネット構造・材料選定を行うことが重要であると考えられる。

本研究では触れられなかった、構造設計全体の見直しによってさらなる向上が求められる。

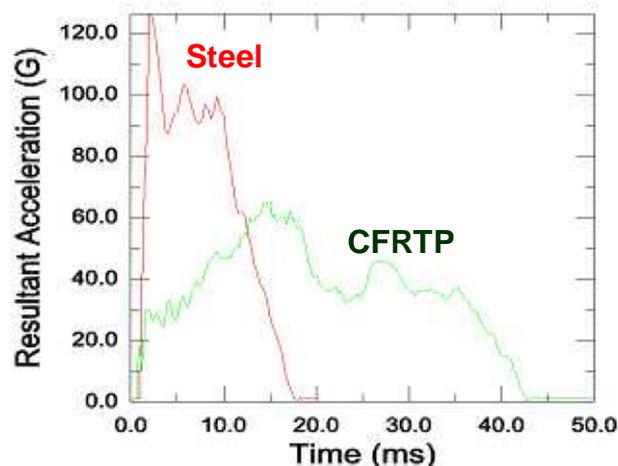


Fig. 14 Comparison of time - acceleration curve

Table4 HIC and peak acceleration of both model

	CFRTP model	Steel model
HIC	275.7	891.7
Peak acceleration (G)	65.3	126.1

## 6. 結論

本研究では自動車における環境・エネルギー対策技術として有効な、CFRP による車両軽量化の早期普及、及び熱可塑性 CFRP の適用フロンティア自体の拡大のために、安全・軽量という特質を持った CFRTP 製ボンネットの提案と評価を行い、CFRTP の持つポテンシャルを実験・解析を通じて明らかにした。

現在、環境・エネルギー問題の深刻化、及び高齢化社会の進展を受け、自動車だけでなくモビリティの在り方自体が問われている。社会の変化から求められる技術もまた変化し、利便性・コストといった従来の価値観から、「人・環境に優しい」ことが価値を持つ時代になりつつある。CFRTP による乗用車ボンネットの安全性・軽量性の向上はそれを実現する一つの手段であり、本研究において示された結果をもとに更なる発展が求められる。

### 参考文献

1. 是則武志・石黒義光他、歩行者頭部保護基準の導入について、独立行政法人交通安全環境研究所
2. (財)日本自動車研究所(JARI), Pedestrian Head impact condition, 2004.
3. Pablo Cruz, Carles Mitjans, Validation of FE-Models of Pedestrian Protection Impactors by means of ABAQUS/Explicit, ABAQUS Users' Conference, 2004.
4. National Crash Analysis Center Homepage <http://www.ncac.gwu.edu/>
5. 斎藤孟, 山中旭, 自動車の基本計画とデザイン, 山海堂, 2002
6. Andy Bailey, Koki Ikeda and Hideki Ishitobi, Development of Aluminum Hood Structure for Pedestrian Protection, Toyota technical center, 2002