

平成19年度修士論文

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
志田 龍亮

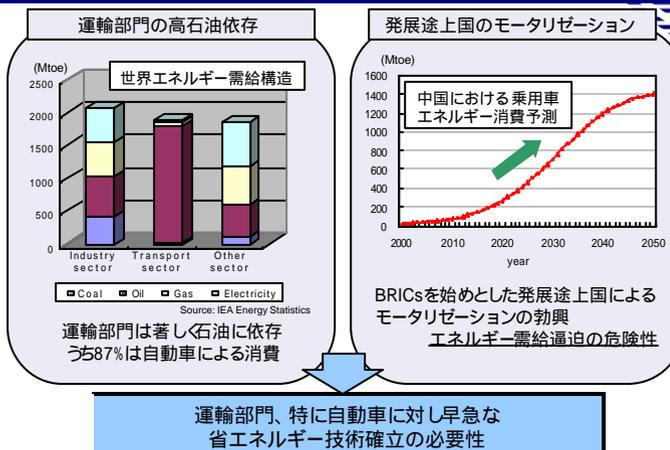
発表構成

1. 研究背景
何故CFRTPボンネットを提案するのか？
2. 既存Steel製ボンネットにおけるFEM解析
FEM解析の妥当性の検証と、既存のボンネットの問題点を確認する
3. 平板衝突モデルによる感度解析
感度解析を通してCFRTPの開発指針を立てる
4. CFRTPパネル材の開発
実際にCFRTPを成形し、その力学特性を評価する
5. CFRTP製乗用車ボンネットの機能性評価
CFRTP製ボンネットの対人安全性・軽量性・健全性を評価する
6. 結論

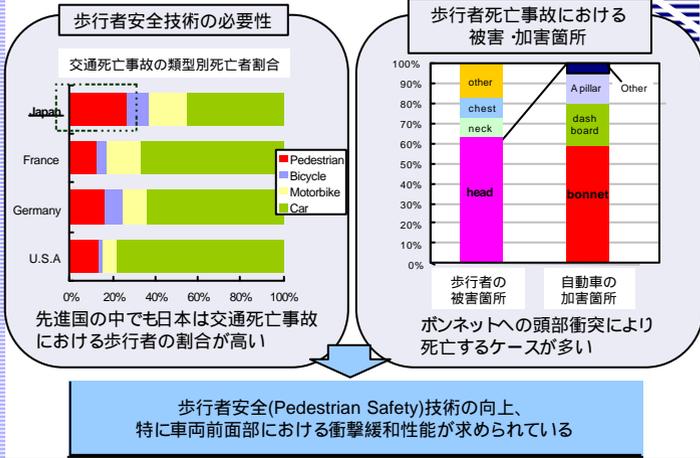
発表構成

1. 研究背景
何故CFRTPボンネットを提案するのか？
2. 既存Steel製ボンネットにおけるFEM解析
FEM解析の妥当性の検証と、既存のボンネットの問題点を確認する
3. 平板衝突モデルによる感度解析
感度解析を通してCFRTPの開発指針を立てる
4. CFRTPパネル材の開発
実際にCFRTPを成形し、その力学特性を評価する
5. CFRTP製乗用車ボンネットの機能性評価
CFRTP製ボンネットの対人安全性・軽量性・健全性を評価する
6. 結論

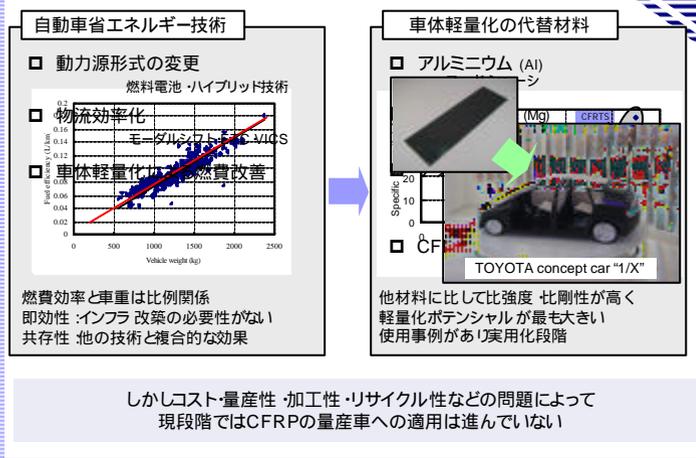
自動車における社会問題 1:省エネルギー技術



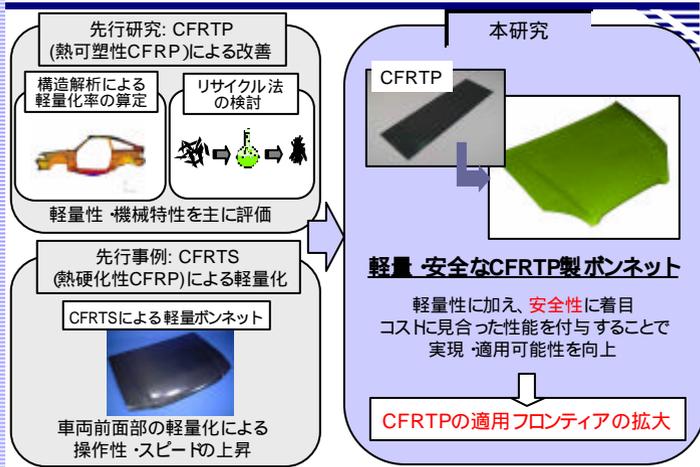
自動車における社会問題 2 対人安全性



先行研究 :CFRPによる車体軽量化



本研究の目的：軽量・安全なCFRTP製ボンネット

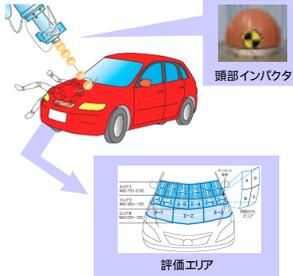


発表構成

- 研究背景
何故CFRTPボンネットを提案するのか？
- 既存Steel製ボンネットにおけるFEM解析
FEM解析の妥当性の検証と、既存のボンネットの問題点を確認する
- 平板衝突モデルによる感度解析
感度解析を通してCFRTPの関連指針を立てる
- CFRTPパネル材の開発
実際にCFRTPを成形し、その力学特性を評価する
- CFRTP製乗用車ボンネットの機能性評価
CFRTP製ボンネットの安全性・軽量性・健全性を評価する
- 結論

解析条件

歩行者頭部保護基準



- 車両の対人安全性指標として国土交通省によって2004年より導入・義務化。
- 歩行者頭部に見立てた頭部インパクトを時速32kmでボンネットに向けて打ち出し、頭部傷害度を計測。

- 評価基準・・・HIC (Head Injury Criterion)

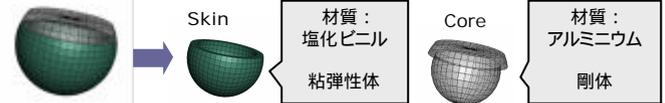
$$HIC = \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1)$$

a : 三軸合成加速度 (m/s²)
 t₁, t₂ : t₂ - t₁ 15 (ms)でHICが最大となる時間

以上の条件をFEMにて再現し 既存Steel製ボンネットの評価を行う

頭部インパクトFEモデルの作成

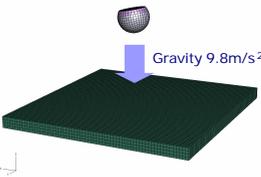
- 歩行者頭部保護基準における頭部インパクトには詳細な要求仕様が規定されている
- 各種公開資料をもとに基準を満たす頭部インパクトFEモデルを作成



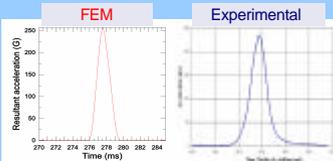
項目	合格基準
(1) 重量	4.5 ± 0.10 kg
(2) 直径	165 ± 1 mm
(3) 自由落下試験	225 - 275 G
(4) 重心と幾何学中心の位置	± 2 mm
(5) 共振周波数	Over 5000 Hz
(6) 慣性モーメント	0.0075 to 0.0200 kgm ²
(7) 加速度計と幾何学中心の位置	± 10 mm ± 1 mm

動解析による判定

頭部インパクト自由落下シミュレーション



- 合格基準・・・最大合成加速度225-275(G)
- 体積弾性率は各種データから既知
- 上記基準を満たすSkin部の初期剪断弾性率を自由落下シミュレーションによる結果から逆算
- 初期剪断弾性率 μ₀=2.8(MPa)のとき基準を満足

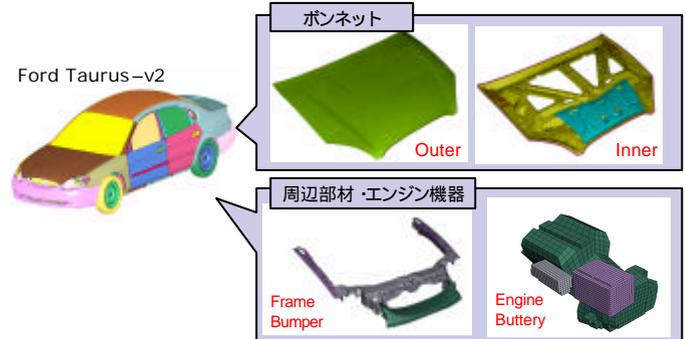


	HIC	Peak acceleration (G)
FEM	248	925
Experimental	255	875
% Error	-5.8%	2.6%

加速度波形・HIC共に良好な精度での再現に成功

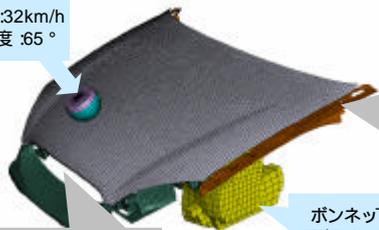
乗用車ボンネットFEモデルの作成

- Ford Taurus-v2におけるFEモデルから抽出 修正
- 頭部インパクト衝突時に干渉すると考えられる周辺部材も併せて抽出
- 材料物性・要素特性はDefault設定 Steel を使用



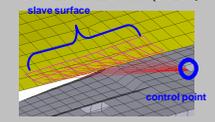
頭部インパクト衝突FEモデル

初速度 :32km/h
衝撃角度 :65°



ボンネットロック
(ストライカー)にも
ヒンジと同様の拘束

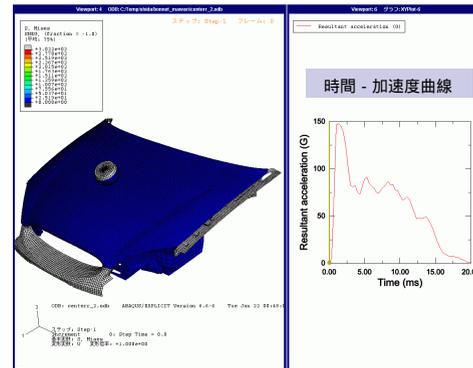
サイドフレームとの間に
仮想ヒンジを設定(拘束)



ボンネット下部にエンジン機器を配置。
頭部インパクト衝突時に過度の変位が
あった場合に接触が起こる(ペナルティ)

出力結果 : SAE ローパスフィルタにて高周波成分を除外
評価: 時間 - 加速度曲線から数値積分プログラムを用いてHICを算出

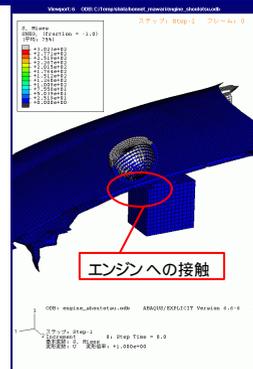
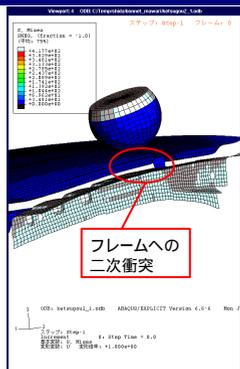
ボンネット中央部衝突解析



	HIC	Peak acceleration (G)
FEM結果	821	148
実車試験における結果	600~1000	100~150

モデルの精度に問題は
ないと考えられる

危険部位における解析結果



	HIC	Peak acceleration (G)
端部衝突	1267	255
エンジン類への接触	4835	350

Steel製ボンネットにおける
危険部位が確認された

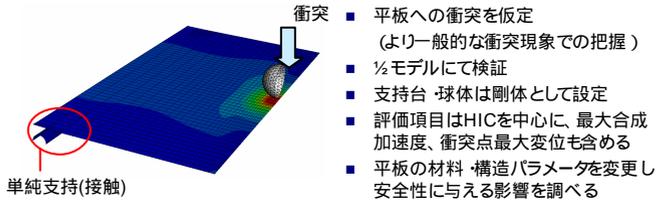
発表構成

1. 研究背景
何故CFRTPボンネットを提案するのか?
2. 既存Steel製ボンネットにおけるFEM解析
FEM解析の妥当性の検証と、既存のボンネットの問題点を確認する
3. 平板衝突モデルによる感度解析
感度解析を通してCFRTPの関連指針を立てる
4. CFRTPパネル材の開発
実際にCFRTPを成形 -その力学特性を評価する
5. CFRTP製乗用車ボンネットの機能性評価
CFRTP製ボンネットの対人安全性・軽量性・健全性を評価する
6. 結論

歩行者保護のための材料・構造の特定

- 歩行者への衝突安全性 ドライバーへの衝突安全性
- 「いかに多くの運動エネルギーを吸収するか」ではなく「いかに人体に損傷を与えないか」が重要
- どのような材料・構造が対人衝突にとって安全なのかを単純平板モデルにおける感度解析から明らかにする

単純平板 衝突モデル

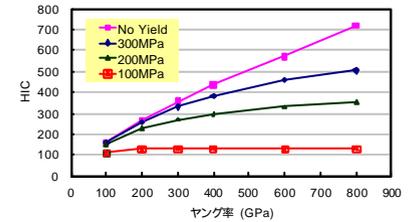


材料物性による感度解析

- 感度解析パラメータ: ヤング率・降伏応力・密度・降伏後挙動
- それぞれのパラメータに対する評価項目の感度を調べる

(結果例)

ヤング率・降伏応力によるHICの違い



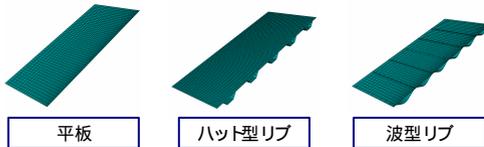
ヤング率上昇
降伏応力上昇
密度上昇
降伏後挙動

HIC増加
HIC増加
HIC低下傾向
脆性破壊を
起こさないことが重要

ヤング率・降伏応力の感度が大きい
機能性を妨げない程度の剛性の低下が安全性の一つの指針

形状・構造による感度解析

- 感度解析パラメータ: 板厚・曲率・リブ構造
- リブ構造については下の三種類を選定。同じ曲げ剛性において、構造が安全性に及ぼす影響を検証



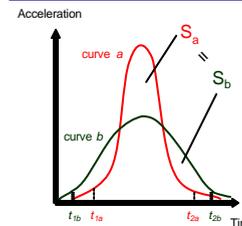
板厚上昇
曲率上昇
リブ構造

HIC上昇・感度大
HIC低下傾向
平板構造が最も高いHIC
リブによる局所的な剛性の違いを確認

板厚の感度が大きい
パネルの全体剛性が影響
局所的な剛性 全体剛性
全体剛性ではなく 局所的な剛性がHICに影響すると考えられる

感度解析における考察

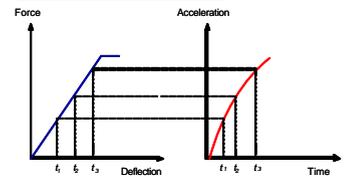
HICから考える材料の安全性



$$HIC = \left[\frac{S}{\Delta t} \right]^{2.5} \Delta t = \frac{S^{2.5}}{\Delta t^{1.5}} \cdot t$$

球体の持つ運動量を「長い時間をかけて緩やかに」回収する方がHICは低い

ヤング率・降伏応力がHICに及ぼす影響

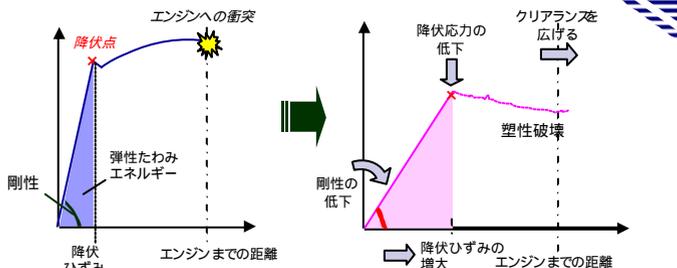


ボンネットの荷重-たわみ曲線 球体の時間-加速度曲線

剛性 降伏応力 加速度曲線の勾配に影響
加速度曲線のピークに対応

これらはHICに直接影響する因子であり感度が高くなったと考えられる

CFRTP製ボンネットの開発指針



1. HICの低下 局所的な剛性を減少
2. 耐デント性の上昇 降伏ひずみを増加
3. エンジンへの衝突を防ぐ 塑性的に破壊
4. エンジンへの衝突を防ぐ クリアランスを拡大
5. 機能性の確保 構造によりカバー

発表構成

1. 研究背景
何故CFRTPボンネットを提案するのか?
2. 既存Steel製ボンネットにおけるFEM解析
FEM解析の妥当性の検証と、既存のボンネットの問題点を確認する
3. 平板衝突モデルによる感度解析
感度解析を通してCFRTPの開発指針を立てる
4. CFRTPパネル材の開発
実際にCFRTPを成形し、その力学特性を評価する
5. CFRTP製乗用車ボンネットの機能性評価
CFRTP製ボンネットの安全性・軽量性・健全性を評価する
6. 結論

開発指針 材料成形

開発目標

適度なヤング率 大きな降伏ひずみ
優れた衝撃吸収能力 + 低比重

使用する繊維 樹脂

- 炭素繊維・・・CF 3Kクロス材 擬似等方性
- 熱可塑性樹脂・・・PC (ポリカーボネート) 靱性・含浸性

試験内容

- 静的三点曲げ 動的三点曲げ

試験目的

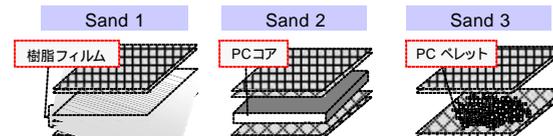
- 作成したCF/PCの力学特性評価・安全性評価
- 解析において使用する各種物性値の取得
- 既存材料(Steel)との比較



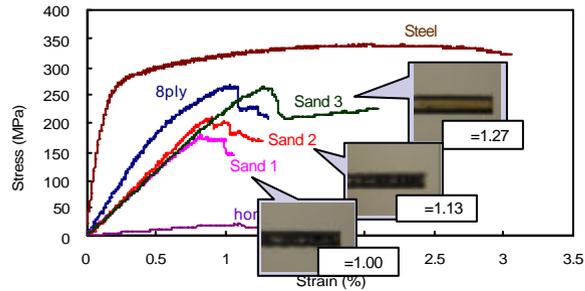
材料成形

- 試験に使用した材料は以下の6種類
- 通常の積層板に加え、サンドイッチ構造も検討
- 同時に、PCコアサンドイッチには異なる3つの成形方法を用い、ポイドが力学特性に与える影響を観察した

試験片名称	積層構成	成形方法
8ply	CF/PCプリプレグを8枚積層	-
sand 1	CF/PC 2枚 + コア + CF/PC 2枚	樹脂フィルムにてPCコア作成
sand 2	同上	予めPCコア作成
sand 3	同上	プリプレグとコアを一括成形
honey	CF/PC 2枚 + ハニカム + CF/PC 2枚	エポキシ樹脂で接着
Steel	JIS規格材を使用	-



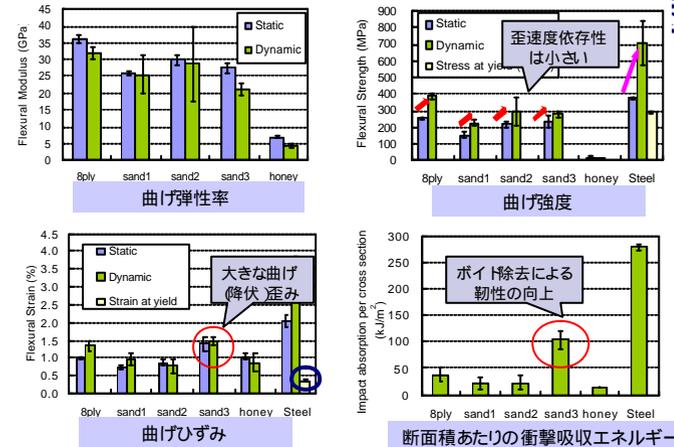
静的三点曲げによる応力 - ひずみ線図



- ボイドの減少と共に、曲げ歪み・曲げ強度が上昇している
- 特にSand3における曲げ強度は、8ply とほぼ同等

ボイドの減少により、CF/PC サンドイッチの機械特性が向上

静的・動的三点曲げ試験結果



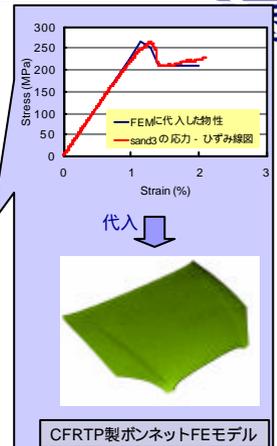
発表構成

- 研究背景
何故CFRTPボンネットを提案するのか?
- 既存Steel製ボンネットにおけるFEM解析
FEM解析の妥当性の検証と、既存のボンネットの問題点を確認する
- 平板衝突モデルによる感度解析
感度解析を通してCFRTPの開発指針を立てる
- CFRTPパネル材の開発
実際にCFRTPを成形し、その力学特性を評価する
- CFRTP製乗用車ボンネットの機能性評価
CFRTP製ボンネットの安全性・軽量性・健全性を評価する
- 結論

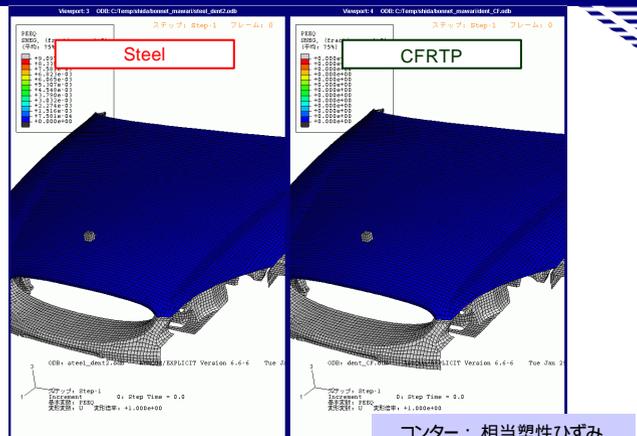
CFRTP製ボンネットFEM解析条件

- 評価基準：
 - 健全性 … 4Gにおける最低剛性の確保
 - 健全性 … 耐デント性の確保
 - 安全性 … HIC 最大合成加速度の最小化
 - 安全性 … 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

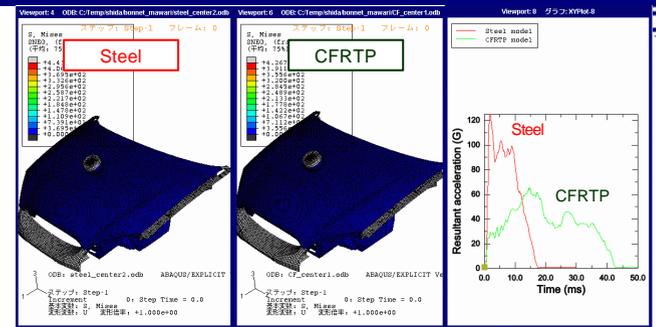
- 材料物性 :CF/PC sand3の実験値を用いる
- 要素特性 (板厚) :健全性を満たす最低板厚
- その他条件 :歩行者頭部保護基準に準拠



耐デント性比較

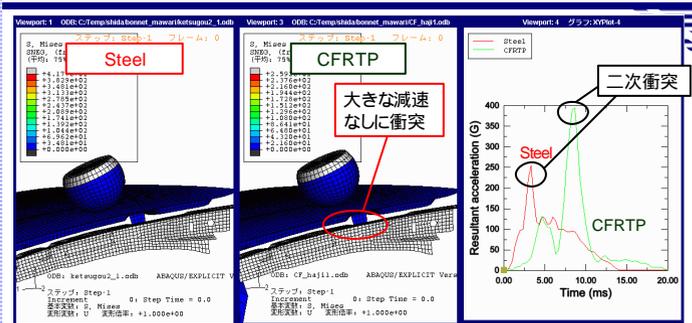


安全性評価 :中央部における衝突



既存Steel製ボンネットの
約1/3のHIC
約1/2の最大合成加速度を達成

安全性評価 端部における衝突



	HIC	最大合成加速度 (G)
CFRTP model	402	3530
Steel model	255	1267

端部においては改善の
必要性が示された

各基準における解析結果

- **健全性** - 最低剛性の確保
 - CF/PC の低比重から、板厚の増加なしに最低剛性を確保
 - Defaultでの板厚設定にてCFRTPの物性値を代入
- **健全性** - 耐デント性
 - CFRTP製ボンネットの優れた耐デント性を確認
- **安全性** - HIC・最大合成加速度
 - 中央部におけるHICは約1/3、最大合成加速度は約1/2と大幅な低減
 - 端部における衝突には改善の必要あり
- **安全性** - 衝突時クリアランスの確保
 - Defaultにおける位置関係においては、エンジンとの衝突なしに衝撃を受け止めることに成功
 - 構造変更により更なる安全性確保が望ましい
- **軽量性**
 - CFRTP製モデルの重量は3.2kgとなり大幅な軽量化が達成

発表構成

1. 研究背景
何故CFRTPボンネットを提案するのか？
2. 既存Steel製ボンネットにおけるFEM解析
FEM解析の妥当性の検証と、既存のボンネットの問題点を確認する
3. 平板衝突モデルによる感度解析
感度解析を通してCFRTPの開発指針を立てる
4. CFRTPパネル材の開発
実際にCFRTPを成形し、その力学特性を評価する
5. CFRTP製乗用車ボンネットの機能性評価
CFRTP製ボンネットの安全性・軽量性・健全性を評価する
6. 結論

結論

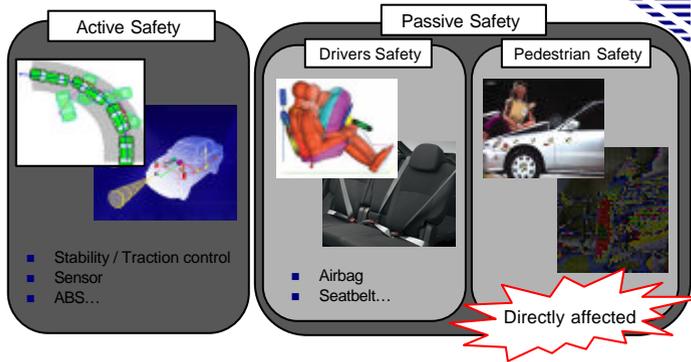
- FEM解析による再現度
 - 頭部インパクトのFEモデルを再現し、実測値との誤差を±5%程度に収めることに成功した。
 - ボンネットへの衝突解析においても、妥当性の高いモデルが開発された。
 - 既存Steelボンネットにおいては危険箇所が存在が明らかになり、改善の必要性が示された。
- 対人安全性の再定義
 - 材料の対人安全性においては、
ヤング率が低いこと 降伏応力が低いこと
降伏歪みが大きいこと 脆性破壊しないこと
の4つが重要となることが明らかとなった。
 - 構造の安全性においては、
全体剛性よりも局所的な剛性がHICに影響すること
リップ形状や曲率によって、効率的な安全性の確保が可能であることが明らかになった。

結論

- CF/PCサンドイッチ材の開発
 - 成形法を工夫することで、ポイドのないPCコア サンドイッチ材(Sand 3)を開発、力学特性の上昇に成功した。
 - 前述の対人安全性の観点から見た場合でも Sand 3はボンネット材料として非常に適していると考えられる。
- CFRTP製ボンネットのFEM解析
 - 健全性 - CF/PCの低比重から、板厚の増加なしに最低剛性を確保でき、かつ耐デント性は大きな利点を持つことが明らかになった。
 - 軽量性 - 従来モデルの約1/5と大幅な軽量化が行われた。
 - 安全性 - 中央部衝突におけるHICは約1/3、最大合成加速度は約1/2と大幅な低減に成功し、CFRTPの持つ安全性・ポテンシャルが明らかとなった。
- 今後の課題
 - 端部におけるHIC上昇の改善
 - CFRTPの物性に合わせた再設計による、更なる安全性・軽量性の向上

ご清聴ありがとうございました

What is safety automobile?

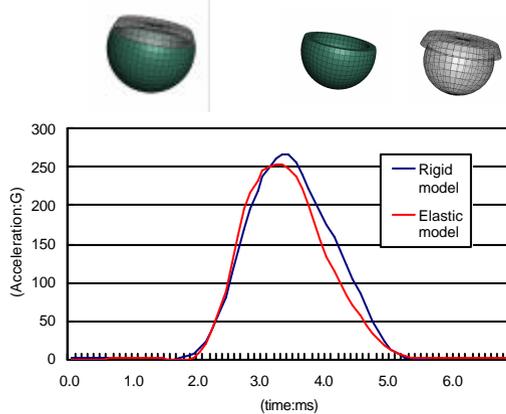


We investigated pedestrian safety functionality of CFRP focusing on **BONNET**

考察

- 歪速度依存性
 - CF/PCの場合は各試験片とも静的・動的試験の結果が概ね一致
 - 歪速度依存性は確認されなかったため、静的試験の結果をFEM解析の物性値として使用することが可能
- サンドイッチ材におけるボイドの影響
 - Sand1, Sand2, Sand3の順にボイドは少なくなっていた
 - ボイドがほとんどないSand3の各種物性値が向上している
 - 安全性基準から見た場合、Sand3は理想的な挙動を示している
- Steelとの比較
 - CF/PCに比べ、高弾性率・高強度であり衝撃吸収エネルギーも高い
 - しかしながら、安全性という観点から見た場合、高弾性率・高強度のSteelよりも弾性率を調整でき、曲げ歪みが大きいCF/PCの方が安全性向上が期待できる
 - 特にSand 3においては、優れた衝撃吸収エネルギー・大きな曲げ歪みが観察され、今回比較した中では最もボンネット材料に適していると考えられる

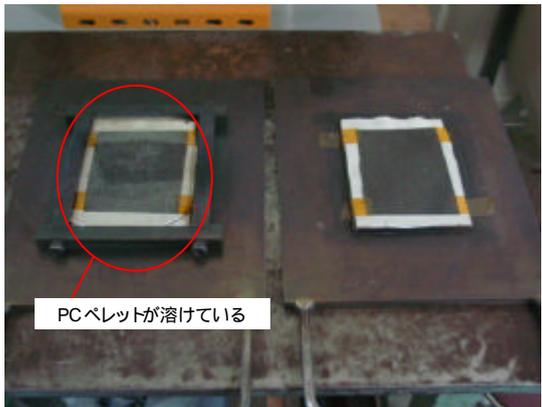
補足： 頭部インパクト コア部 弾性体と剛体



各試験片断面図



Sand 3 成形の様子



動的三点まげ試験結果

