

ICVS「ステップデッキ」に適用した CAE衝突挙動予測技術

Simulation Technique for Crashworthiness Applied to the ICVS Step Deck

清 田 悟* 山 崎 健* 関 田 孝 人*
Satoru KIYOTA Takeshi YAMAZAKI Takahito SEKITA
藤 原 清 隆* 中 村 豊 一*
Kiyotaka FUJIHARA Toyokazu NAKAMURA

要 旨

ICVS(Intelligent Community Vehicle System)「ステップデッキ」は、21世紀の新しい都市型交通手段を提案することを目指して開発された車両の中の、一人乗り四輪ハイブリッドコムータである。小型・軽量でありながら、衝突時の乗員保護性能は、正面および側面衝突ともに国内乗用車の乗員保護基準適合を重点目標のひとつに設定した。

CAEによる衝突挙動予測技術を適用することによって、以下の車両構成を成立させ、目標とした乗員保護性能を達成した。

- ・衝突エネルギーが吸収可能なクラッシュアブルフロントフレーム構成と衝突ストロークの確保
- ・車体と乗員の連成挙動解析に基づく車体減速特性に優れたアンダフレーム構成
- ・キャビンのスレッドモデルを用いた解析結果に基づく乗員拘束装置

ABSTRACT

“Step Deck” is a 4-wheeled hybrid vehicle with a single seat developed for the ICVS (Intelligent Community Vehicle System) which is proposed as a new urban transportation toward the 21st century. In spite of the light weight and small sized vehicle, the occupant's protection at the collision was considered as one of the emphasis targets, and was set to apply to the occupant's protection standard for passenger car in Japan.

Applying the forecast technologies using CAE for crashworthiness, the following vehicle construction was completed and the target on occupant's protection was achieved.

- Construction of the crushable front frame which can absorb the collision energy and secure the absorption stroke.
- Under frame construction producing suitable deceleration characteristics of vehicle body based on the coupled behavior analysis of the body and driver.
- Occupant's restraint system based on the analysis results using the sled model of cabin.

1. はじめに

ホンダが提唱する近未来型地域交通システムICVS(Intelligent Community Vehicle System)を具現化する乗り物のひとつとして、一人乗り四輪ハイブリッドコムータの「ステップデッキ」を開発した¹⁾。「ステップデッキ」の開発にあたっては、環境対応および衝突時の乗員保護を重点的に実施した。

衝突時の乗員保護に対しては、国内の交通事故統計データを参考に検討した結果、正面衝突、側面衝突ともに、下記の国内乗用車の乗員保護基準の達成を目標とした。

- (1) 正面衝突：固定壁に対する車速50km/h衝突で、頭部、胸部、大腿部の傷害計測値が基準値を超えない。

- (2) 側面衝突：ECE仕様のムービングデフォーマブルバリア(以下、MDB)を使用して、車速50km/h衝突で、頭部、胸部、腹部、腰部の傷害計測値が基準値を超えない。

「ステップデッキ」の外観写真およびその主要諸元をFig.1, Table 1に示す。「ステップデッキ」の乗員保護手法は、乗用車と同様にシートベルトによる拘束を基本とした。しかし、全重量が370kgの小型・軽量車両では、衝突時乗員移動による車体挙動の変化が大きく、かつ全長2400mmという限られたスペースの中でクラッシュスペースおよびキャビン内の乗員移動スペースの確保と乗員の居住性を両立させることは困難であることが予想された。

そこで車体仕様の検討は、実車衝突テストのトライアン

ドエラーを繰り返すよりもコンピュータシミュレーションによる予測技術を活用することとした。また、小型・軽量車両特有の問題を洗いだすために、フルラップ正面衝突については、乗員を単純な集中質量でモデル化した車体のみの場合と、車体に乗員ダミーのFEMモデルを乗車させた状態(以下、フルビークル)との二通りのシミュレーション解析をした。

以下に車体設計手法の概要、ならびに解析計算の実施例を述べる。



Fig.1 Step Deck

Table 1 Specifications of Step Deck

Item		Specifications
Dimensions (L × W × H)	(mm)	2 400 × 1 185 × 1 690
Maximum speed	(km/h)	60
Vehicle curb weight	(kg)	370

2. 車体骨格構成の検討

2. 1. 正面衝突対応

車体構成は乗員保護の観点から、乗員居住スペースと車体前面の衝突圧壊部分に分けた構成とした。居住スペースは高張力鋼管を用いた高剛性アンダシャシフレームで構成し、衝突エネルギーを吸収する車体前面の部分には重量低減効果および安定した圧壊荷重を得ることをねらいとして、Fig.2に示すようにアルミニウム合金製角パイプを用いたクラッシュャブルフロントフレームを採用した。

また、衝突時に変形してホイールを側方へ逃がすリーディングアーム形式のフロントサスペンションを採用し、クラッシュストロークの確保をねらった。

2. 2. 側面衝突対応

キャビンスペースの確保は正面衝突と同様にアンダシャシフレームで行い、乗員拘束はシートベルトと上体ガードで行った。

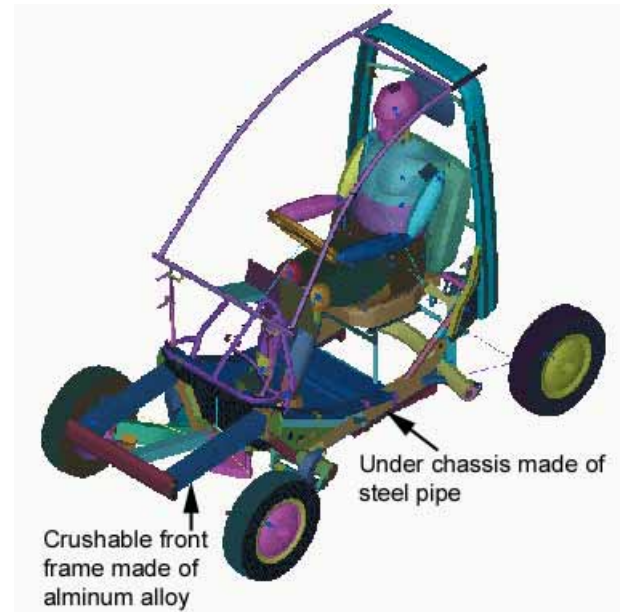


Fig.2 Full vehicle model

3. フルラップ正面衝突解析でのCAE活用

3. 1. クラッシュャブルフロントフレーム設計

車体設計での衝突解析のフローチャートをFig.3に示す。以下フローチャートに沿って説明する。解析の第一歩として材料特性、断面形状の検討を行うために、Fig.4に示す角パイプ単体の一軸圧縮試験の計算から開始した。

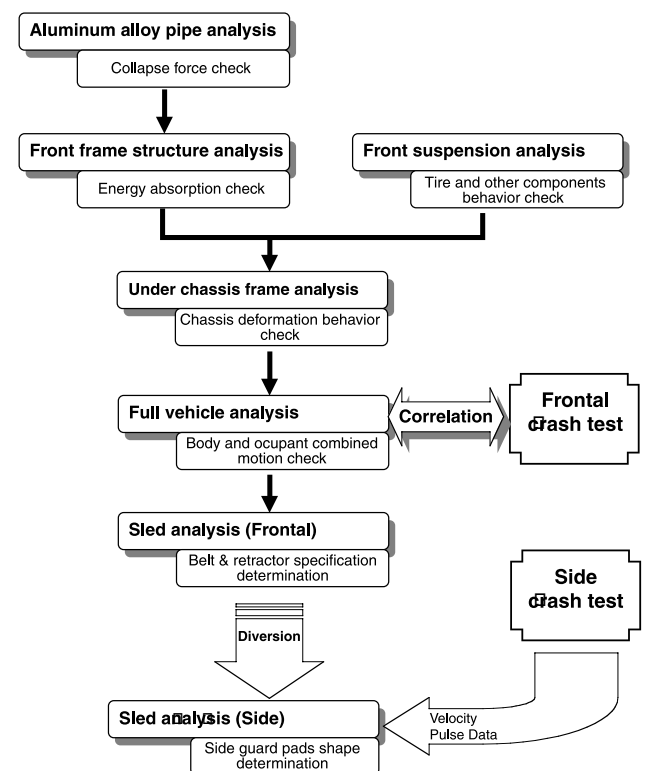


Fig.3 Crash analysis flow using CAE

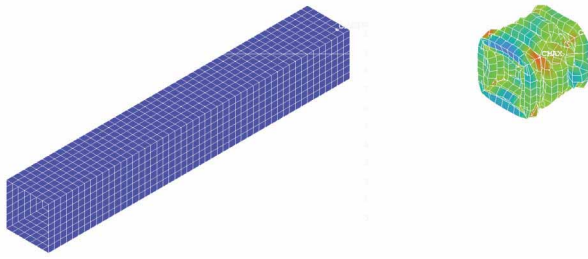


Fig.4 Deformation of square pipe

変形の安定性、適切な変形荷重、特許などを考慮して、衝撃吸収圧壊部材には6 000系アルミニウム合金製正方形断面パイプを選定した。Fig.5は縦70mm、横70mm、板厚2 mmのパイプの一軸圧縮時の圧壊荷重特性を示す。圧壊開始時から、ほぼ一定の安定した圧壊特性が得られていることが分かる。ここで、得られた平均圧壊荷重は、26kNとなり、式(1)のマハモッドの経験式²⁾と良く一致している。

ここに、

$$P = 2 \left\{ \frac{KE}{\beta(1-\nu^2)} \right\}^{0.43} (1+d/b)t^{1.86} b^{0.14} \sigma_y^{0.57} \quad (1)$$

$$K=f(d/b), \beta=f(t/b)$$

- P**: Crush load
- E**: Young's modulus
- ν : Poissons ratio
- σ_y : Yield stress
- d**: Height of pipe
- b**: Width of pipe
- t**: Thickness of pipe

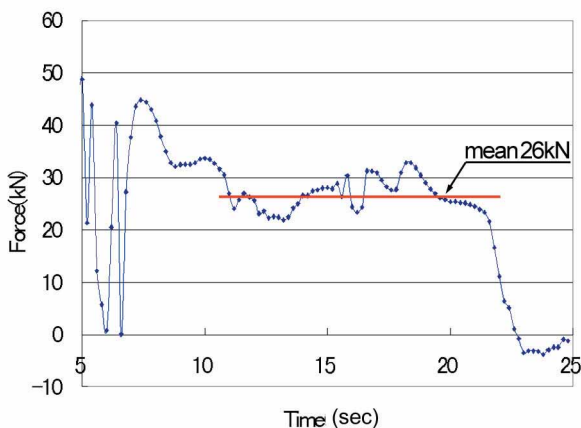


Fig.5 Behavior of 70×70×2 alminum pipe collapse

続いて動的圧縮テストおよび計算を行い、歪み速度の変化による変形挙動および圧壊荷重への影響を確認した結果、Fig.5の一軸圧縮試験の結果と違いがほとんど無いことが確認された。

次にFig.4に示したパイプを用いて衝突エネルギーを吸収させるフロントフレームの形状を計算し、Fig.6に示す形状を決定した。さらに、コンピュータシミュレーションを用いてこのフロントスペースに対し、最適減速度およびストロークとなるようにFig.7に示すフロントサスペンションアームの最適仕様を算出した。

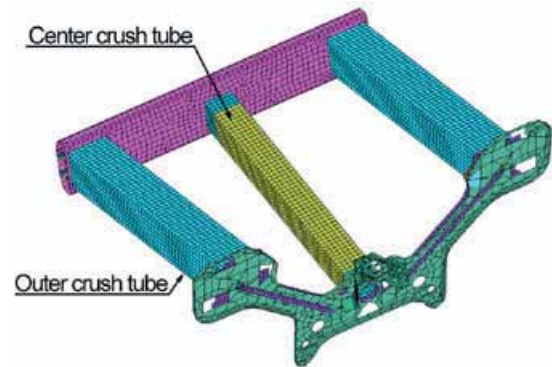


Fig.6 Front frame model

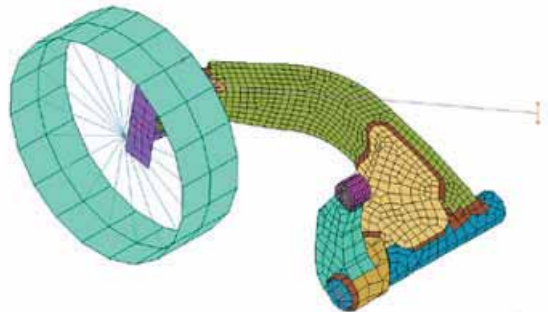


Fig.7 Front suspension arm model

3. 2. 車体挙動解析モデル構築

(車体+乗員連成解析の検討)

車体全体の解析およびテストを実施する前に、Fig.8に示すアンダシャシフレーム(以下、アンダフレーム)モデルを用いて、解析による車体減速特性の検証を行なった。Fig.9は、タイヤの外側への変形挙動およびフロントフレーム圧壊挙動がアンダフレームモデルにおいても、各要素検討時のねらいどおりの挙動が得られていることを示す。

次に、軽量車両では乗員の挙動が車体減速特性に及ぼす影響を無視できないことから、車体+乗員の連成挙動を詳細に確認するために、Fig.10に示すようにアンダフレームモデルにHybridIIIダミーモデルを組込んだフルビークルモデルでの解析を行った。

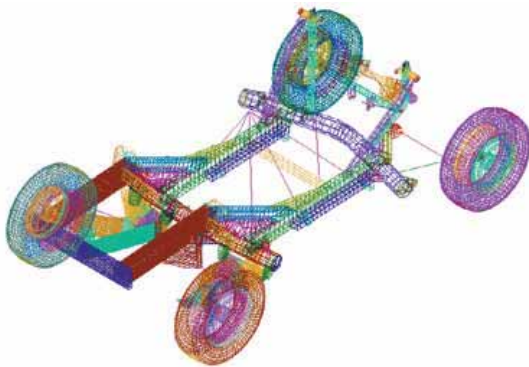


Fig.8 Under frame model

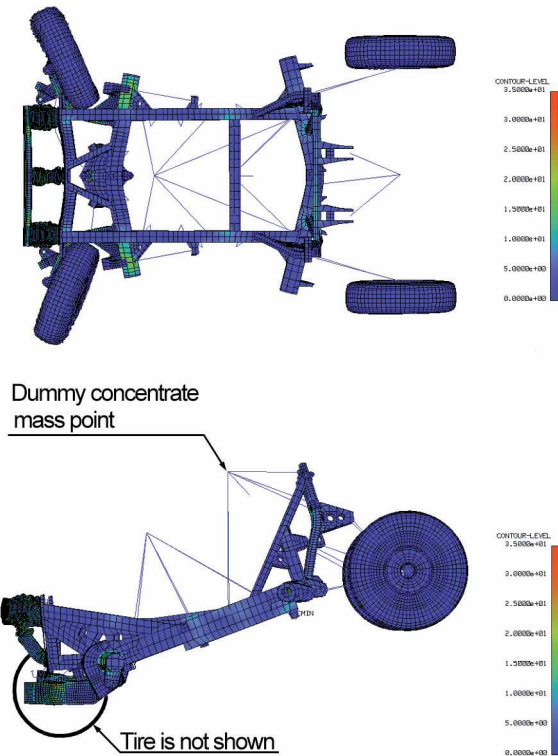


Fig.9 Deformation of under frame model



Fig.10 Deformation of full vehicle model

Fig.11にフルビークルモデルの解析結果をもとに、アンダフレームモデルを改良した結果を示す。アンダフレームモデルの車体速度について実機テストとの相関レベルを確認したものであり、アンダフレームモデルで車体減速特性の評価が可能であることを示している。

具体的には、アンダフレームモデルの乗員を表現するダミー集中質量ポイント(以下ダミーポイント)を結合するバネ要素を修正して、ダミーポイントの加速度、移動量を改良した。Fig.12はアンダフレームモデルのダミーポイントの減速度波形をテストデータと比較したグラフである。すなわち、ダミーポイントの加速度、挙動については、アンダフレームモデルとテストデータは概ね一致して、アンダフレームモデルで車体と乗員の連成挙動を表現できる。

その結果、車体減速特性のパラメータスタディのベースモデルとしてFig.8のアンダフレームモデルを活用できた。

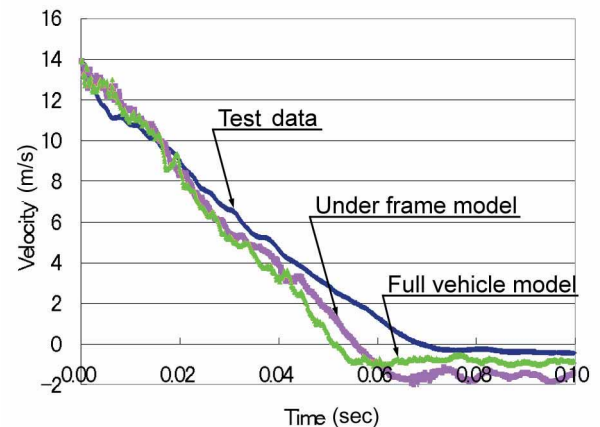


Fig.11 Frame velocity correlation

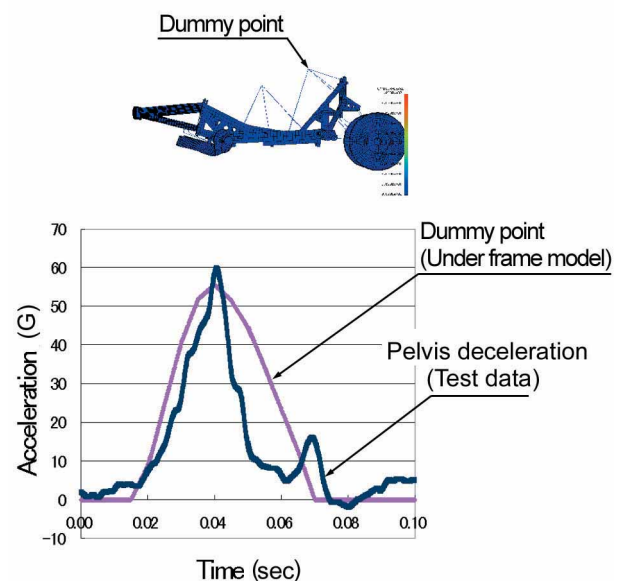


Fig.12 Acceleration of dummy point

3.3. 衝突圧壊モデル構築

Fig.13, 14, 15は、タイヤの外側への変形挙動及びフロントフレーム圧壊挙動について実車テストと計算結果がよく一致していることを示す。

本車両は370kgと軽量であり、目標車体減速特性を得るための必要反力が小さく、車両重量の大きい普通四輪車とは異なり、タイヤ、ホイール等の剛性および強度を忠実に表現する必要があった。

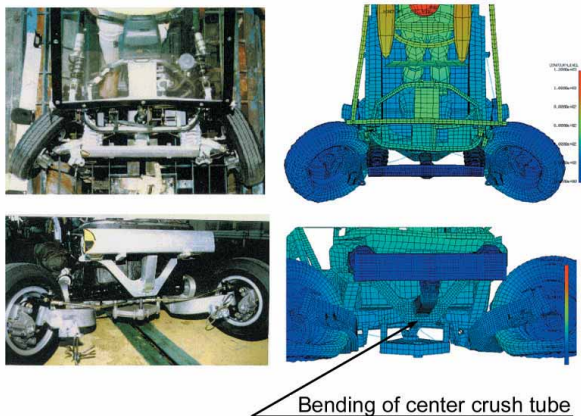


Fig.13 Outwards movements of the wheels

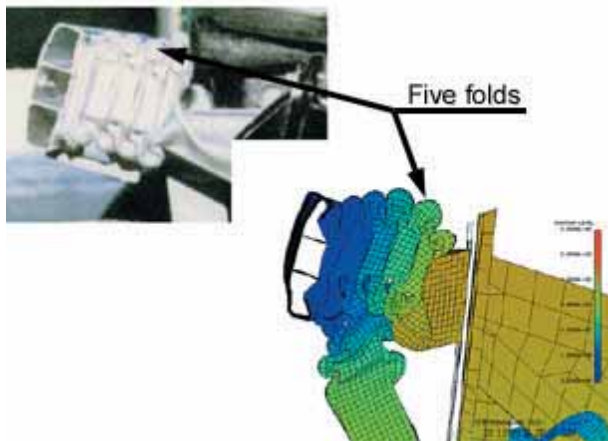


Fig.14 Crush tube kinematic behavior

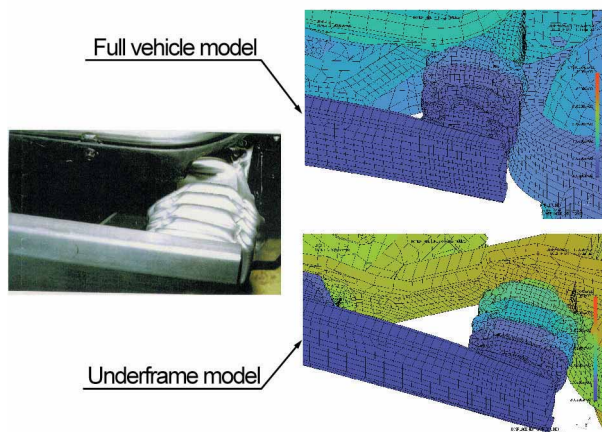


Fig.15 Outer crush tube kinematic behavior

ここで、タイヤは正規の空気圧を与えたモデルを採用し、かつ、ホイール、フロントアームの回転結合を定義することで、衝突時の実機タイヤ挙動が再現できた。また、Fig.13に示すセンタクラッシュチューブが折れ曲がる現象は、熱処理型アルミニウム合金の溶接後の機械的特性劣化を考慮することで実機の挙動が再現できた。

3.4. 正突における乗員傷害値の解析

Fig.16にキャビンスレッドモデルを示す。スレッドモデルはフルビークルモデルと比較して、形状変更が容易でありパラメータスタディに使用しやすいため、乗員傷害値に注目し、シートベルトおよびシート仕様のパラメータスタディを行った。

スレッドモデルは、ピッチングを無視する代わりに衝突テストの画像データからロールバーの変形を求めて、シートベルトショルダアンカのD-リングの変位でロールバーの変形を置換えるとともに、Fig.11に示した速度波形を入力して乗員傷害値を求めた。

その他、膝から入力する荷重については、内装部品に相当する非線形接触面を設けた。その結果、Fig.17に示すように、スレッドモデルの減速度波形はテスト波形と相似形となり山谷の位置がほぼ一致している。

3.5. 正突における乗員拘束装置(ベルト、リトラクタ)の検討

正突時乗員傷害値のキャビンスレッドモデルによるパラメータスタディの結果、シート位置、ベルト、リトラクタ特性を適正にすることにより、エアバッグ無しで、目標値を達成できる見通しを得た。

正突時はダミーの頭部がステアリングホイールと接触す

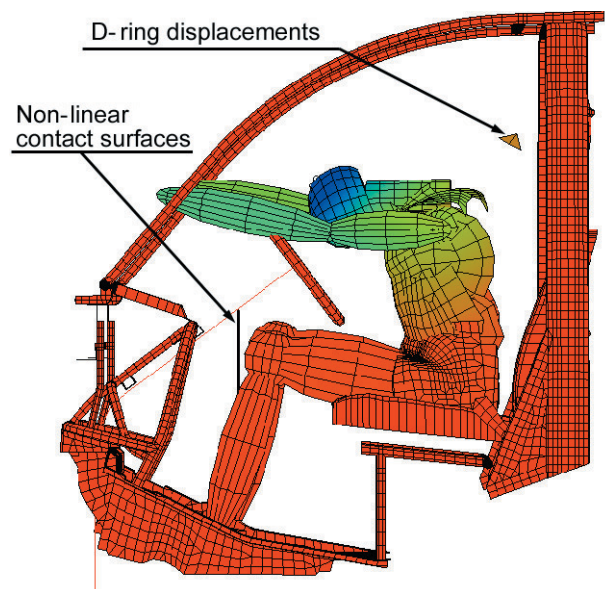


Fig.16 Occupant sled base model

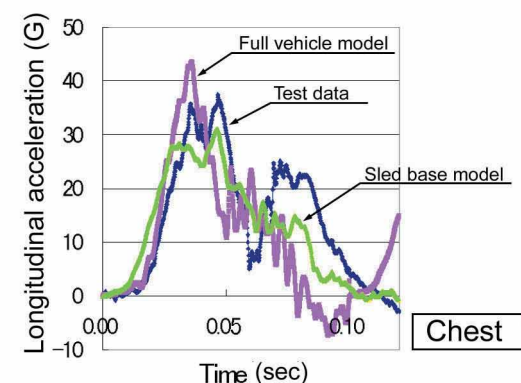
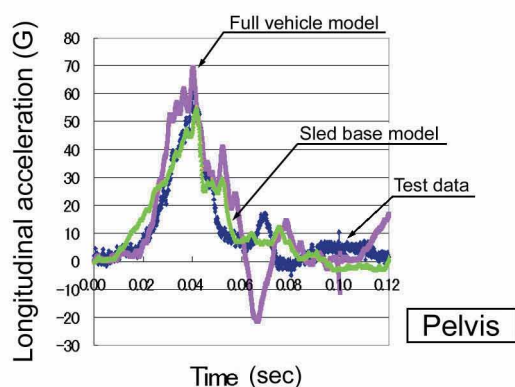


Fig.17 Injury deceleration data of occupant

る危険があることから、これを回避するために張力の高いベルト、ロック性能を高めたリトラクタを選定し、乗員拘束力を上げた。胸減速度は上昇するがダミーの移動量を減少させられるタイプを採用した。Fig.18, 19はベルト、リトラクタの拘束性能を高くしても、胸減速度が目標である国内乗用車の乗員保護基準60G以内に収まっており、同時にその影響で上昇傾向にある頭部減速度も問題ないことを示している。

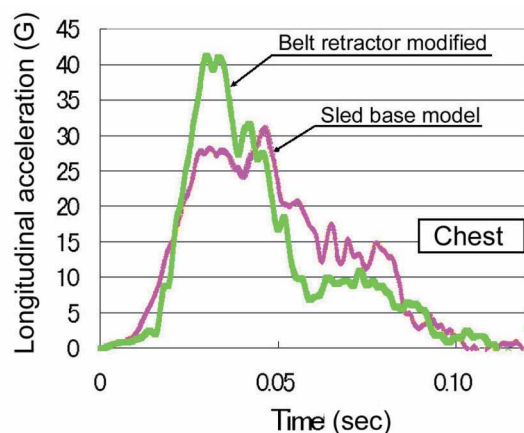


Fig.18 Chest deceleration (Parameter study)

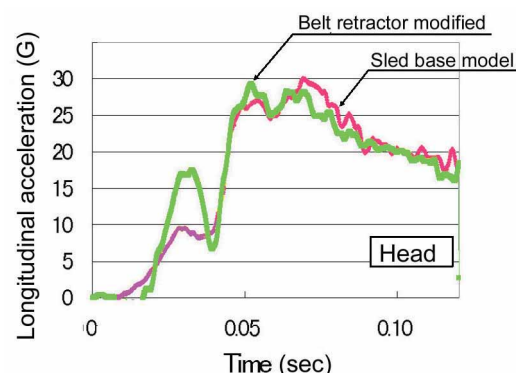


Fig.19 Head deceleration (Parameter study)

4. 側面衝突解析の設計への適用

4.1. 側面衝突テスト結果

側突については、まず実車側突テストを行い、車体、乗員の挙動を把握した。以下にその概略を記す。

- ① 370kgの車両重量に対し、約1500kgのMDBが後輪を含む車体側面後部に衝突して、ヨーイングしながら車体は跳ね飛ばされる挙動を示した。
- ② 乗員は慣性によってその場に残ろうとするため、相対的に車体から横方向へ脱出しようとし、逸脱防止策が必要であり、暫定的に上体ガードを取り付けたところ逆に乗員に大きな傷害値が発生し、さらなる対策が必要となった。
- ③ 車体のローリングはわずかであった。

4.2. 側面衝突における乗員傷害値の解析

前述の側突テストから乗員の傷害値軽減策として上体ガードパッド、腰パッドが必要になったため、シミュレーションによる形状検討を行った。車体は剛体スレッドモデルを使用し、側突テストの車体横方向速度波形を入力し、ヨーイング、ローリングは無視して計算した。Fig.20は側突

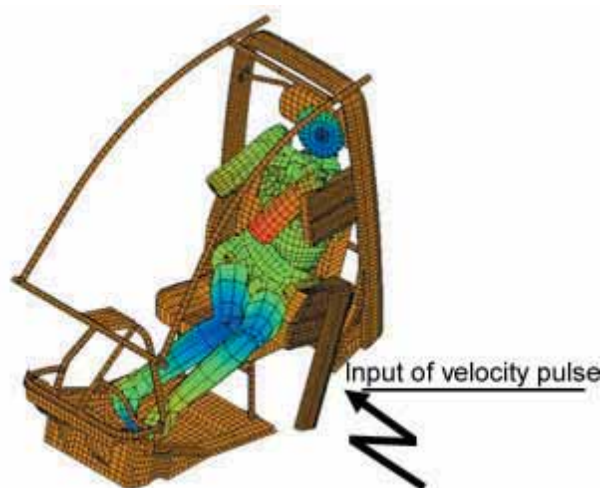


Fig.20 Side impact kinematic behavior

テストの車体横方向速度波形を入力して、計算した挙動である。

なお、乗員はEUROSIDモデルを使用し、シートはハニカム材料モデルを使用した。

Fig.21はベース仕様およびベース仕様に対してパッド形状、位置を変更した対策案の側突における挙動である。

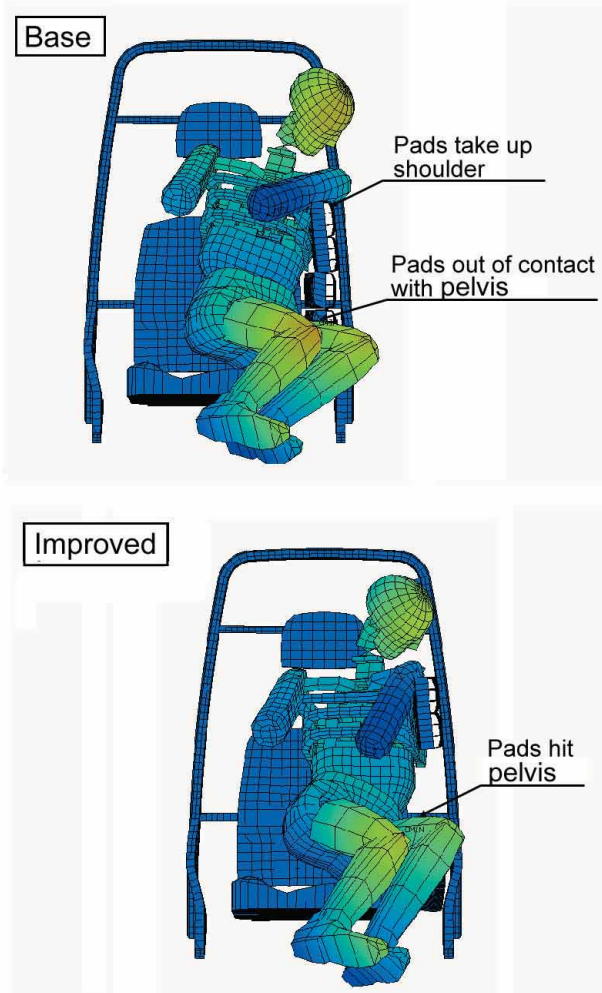


Fig.21 Side impact parameter study

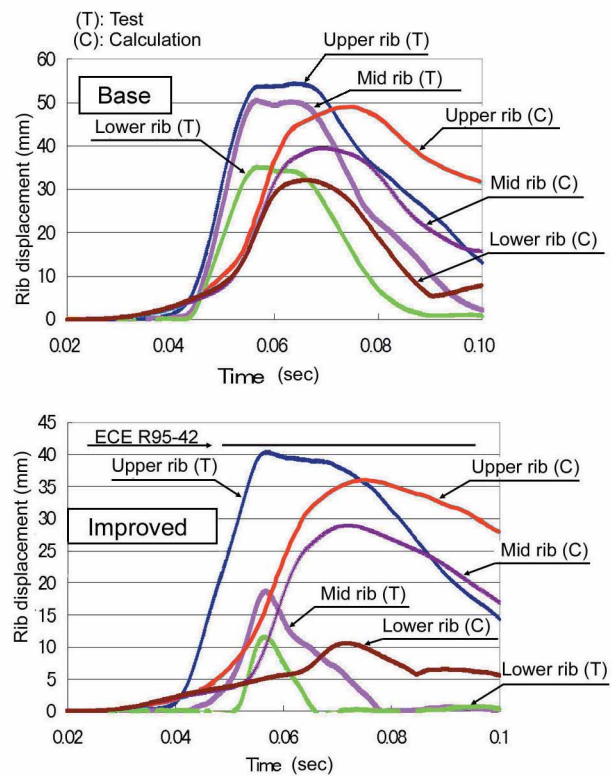


Fig.22 Rib displacement

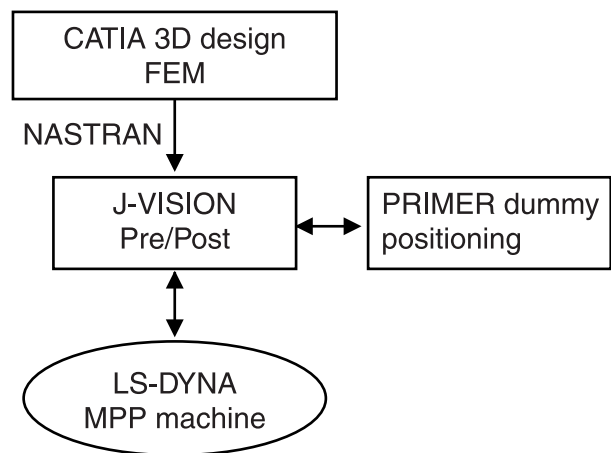


Fig.23 Flow of FEM calculation

4. 3. 対策仕様の側突テスト結果

計算によって決定された仕様を用いてテストした結果をFig.22に示す。

Fig.22のベース仕様では、肋骨の変位がテスト計測値と計算値とでほぼ一致している。対策案においては、肋骨変位が乗員保護基準値である42mm以内に収まっていることを示している。

なお、対策案として後方視認性を考慮した仕様で実施した解析計算及びテストにおいても、目標を達成した。

5. 計算環境

「ステップデッキ」における車体設計のCAE解析フローをFig.23に示す。概念設計からFEM形状モデル作成まで全作業をCATIAで行い、その後、J-VISIONを用いて、LS-DYNA特有の材料プロパティおよび荷重境界条件を作成した。作成したデータでLS-DYNA(並列環境)による衝突計算を行なって、計算結果の出力には再びJ-VISIONを使用した。PRIMERはダミーポジショニングソフトとして利用した。

6. まとめ

CAEによる衝突挙動予測技術を小型・軽量車両のICVS「ステップデッキ」に適用し、以下の成果を得た。

- (1) CAE衝突予測技術を適用して目標とした乗員保護性能を達成できた。
- (2) 衝突時にタイヤが衝突ストロークの確保を阻害しない構造としたリーディングアーム式フロントサスペンション、および安定した圧壊荷重を発生するアルミニウム合金製角パイプ3本で構成されるクラッシュブルフレームの採用により、目標とした衝突エネルギーの吸収を達成した。
- (3) 車体と乗員のフルビークルモデルにより確認した乗員挙動および車体減速度をアンダフレームモデルに反映し、車体減速特性の良い結果を得ることができた。
- (4) 実機衝突テストの速度波形、衝突画像などを入力して作成したキャビンのスレッドモデルを使用したことにより乗員傷害値を効率よく検討できた。

最後に、ICVS「ステップデッキ」は今後のシステム改良および実際の地域展開に反映すべくツインリンクもてぎ(栃木県)で試験運用中である。

謝 辞

ICVS「ステップデッキ」の衝突解析にあたり、モデルの構築に協力して頂いた(株)日本総合研究所、OveArup & Partners社の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 安達ほか：近未来型地域交通システム「ホンダICVS」の紹介, HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.1, p.1-6(1999)
- 2) Mahamood, H. F., Paluszny, A.: Design of Thin Walled Columns for Crash Energy Management-Their Strength and Mode of Collapse, 4th International Conference on Vehicle Structural Mechanics, 1981

■ 著 者 ■



清田 悟



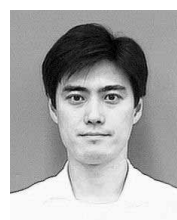
山崎 健



関田 孝人



藤原 清隆



中村 豊一