

特集 : CX-7

4

## CX-7のゼロプロト開発実現に向けたCAE適用技術 CAE Application Technology in CX-7 Development

杉本 繁\*1 上野 正樹\*2 菊池 荘吉\*3  
Shigeru Sugimoto Masaki Ueno Sokichi Kikuchi  
藤川 孝司\*4 大原 司\*5  
Kouji Fujikawa Tsukasa Ohhara

### 要 約

試作車両を使った育成プロセスをCAEバーチャル検証に置換するゼロプロト開発による商品開発の期間短縮は、お客様へのタイムリーな商品提供だけでなく開発投資削減をはじめメリットが大きい。しかし一方で、実車による最終評価において、狙いとした性能が確保できていない場合には大幅な量産遅らし等、抱えるリスクも大きくなる。CX-7では、様々な前提条件を設けて開発したベリーサと比較し、新開発のプラットフォームの使用、デザインの自由度拡大、対米新規制対応等、難易度の高い開発に対し、最新のCAE技術を駆使することでゼロプロト開発に挑戦した。その結果、「操縦安定性、衝突安全、NVH」の主要3性能を左右する車体骨格系の構造を早期に確定することができた。

### Summary

Shortening product development period through Zero Prototype by skipping prototype verification process is beneficial not only to cut down development investment but also to timely provide customers with our products. On the other hand when the targeted performance is turned out to be not secured in the last stage of physical evaluation, development will be exposed to enormous risks such as substantial delay in mass production. CX-7 was compared with Verisa, developed under varied prerequisites, and we challenged developments of high difficulty by taking advantage of the latest CAE technology ; utilizing newly developed platform, expansion of design latitude, and accommodation of new regulation for North America. As a result, body frame system which influences three main performances " Handling Stability, Cash Safety, and NVH " were able to be fixed in early stage of development.

### 1. はじめに

CX-7は、2004年に発売したベリーサに続いてトップハットゼロプロト開発に取り組んだ車である。トップハットゼロプロト開発とは、アッパー試作車による育成というプロセス (Fig.1の①) をスキップすることである。これにより開発期間を短縮し、工数・試作費用といった開発投資を削減することができる。出図後は、「開発確認車」という車両を製作して確認を行うだけで、全ての検証は出図段階で完了しておく必要がある。この検証には、1996年から取り組んできたMDI ( Mazda Digital Innovation ) を最大限

に活用したCAEを軸とするバーチャルでの開発プロセスを適用した。本稿では、CX-7開発において新たに適用したCAE技術についてフォーカスしながら開発プロセスで工夫した点を紹介する。

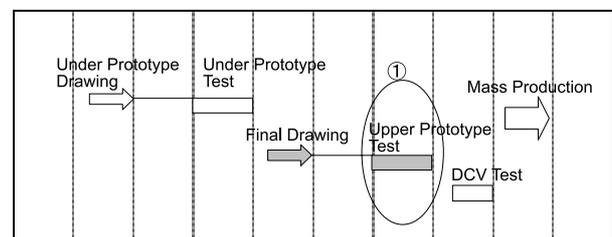


Fig.1 Development Process

\*1~3 衝突性能開発部  
Crash Safety Development Dept.

\*4, 5 NVH性能・CAE技術開発部  
NVH & CAE Technology Development Dept.

## 2. 開発プロセス

### 2.1 ベリーサ開発との相違点

ベリーサ開発では、既に量産していたデミオのプラットフォームを使用し、ピラー角度や各ハードポイントといったアッパーボデーデザインへの制約を設けて開発を行った (Fig.2)。それに対し、CX-7開発では新開発のプラットフォームを使用し、アッパーボデーデザインにも一切規制を設けていない。構造的にもデザイン的にも自由度を拡大したところが大きく異なる点である。これによって技術的な難易度は大幅にアップしており、ベリーサをゼロプロト第一世代とすると、このCX-7は第二世代に相当する。

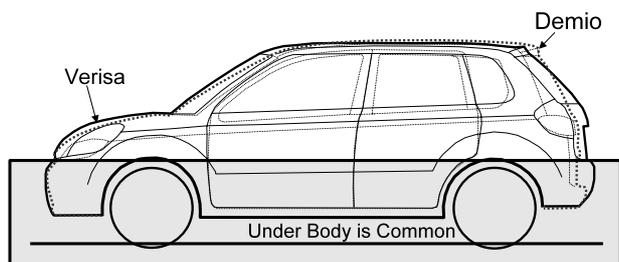


Fig.2 Demio vs Verisa

### 2.2 CAEプロセス

上記の難易度を克服するために開発プロセス上、以下の点を工夫した。

#### (1) アンダー試作車での工夫

通常、既存車種のアッパーボデーを載せるアンダー試作車に対して、CX-7ではAピラーの角度補正などを行い可能な限りシルエットを似せた試作車を作成した。この試作車とCAEのコリレーションをとることで、正式図モデルのCAE精度を大幅に向上させた (Fig.3)

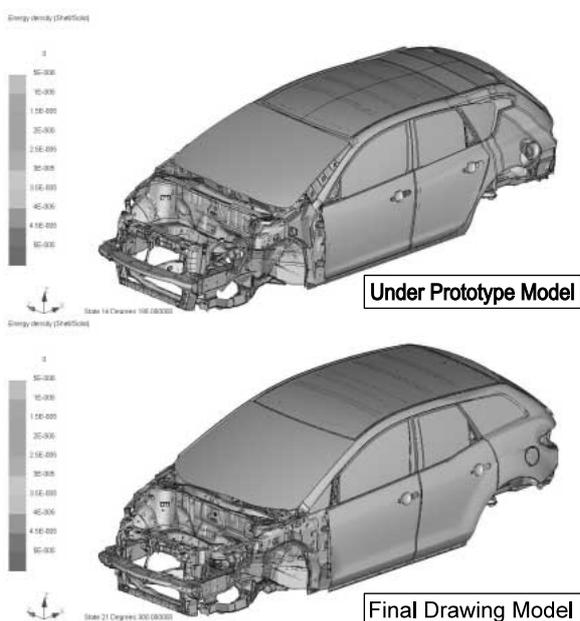


Fig.3 Under Prototype Model vs Final Drawing Model

#### (2) CAE検証期間の確保

正式図前にCAE評価用の検証図を出図。この図面に基づく検証期間を確保し、CAEで全ての性能を整合取った上で、正式出図を行うことで図面品質のレベルを大幅に向上させた。

#### (3) CAE適用項目の拡大と能力アップ

CAE適用項目は、ベリーサで125項目だったものを363項目まで拡大した。この中には仕向け地が異なるため追加される評価項目だけでなく、車種開発でははじめてトライする新技術の27項目を含んでいる (Fig.4)

CAE能力のアップは、CAEモデルを作成するために、モデル作成専属チームをつくり、モデル作成期間を4週間に短縮。倍増させたスパコン能力をフル活用することで、解析結果の処理を早めた。その評価に関しては、CAEエキスパートを一ヶ所に集め24時間集中評価活動を実施することにより、性能間の整合取り期間を大幅に短縮した。

以下の章では、各性能別にCAE適用技術について紹介する。

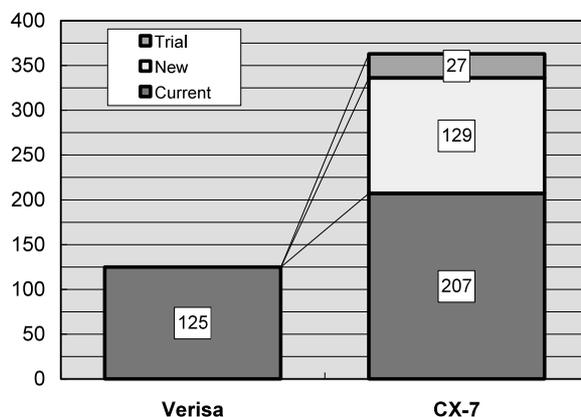


Fig.4 CAE Evaluation Items

## 3. CAE適用技術の紹介

### 3.1 車体剛性開発

#### (1) 局部剛性評価

車体剛性は、乗り心地・操縦安定性に大きな影響を与える。CX-7の開発では、きめ細かく車体剛性をコントロールするために、従来から指標として用いてきた曲げ・ねじりといった車体全体の剛性値に加えて、Fig.5 (注; 変位を1,000倍にして変形状況を分かりやすく表示) に示すようなキャビン部分のマッチボックス変形時の対角変位という局部的な変形量を局部剛性として新たな評価指標として追加し、開発を行った。

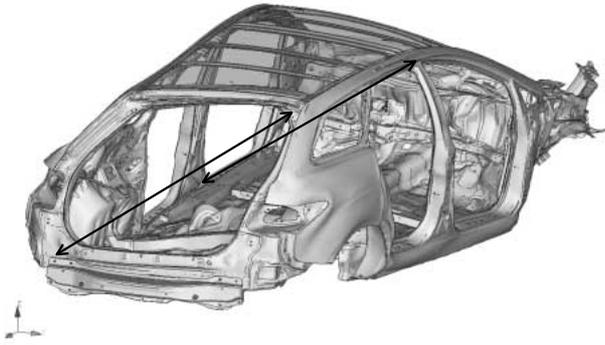


Fig.5 Diagonal Displacement

(2) 局部剛性向上ポイント

局部剛性評価によって織り込んだ内容をFig.6に記す。サイドシル部の筋やシート取付部補強など、従来の車体全体剛性評価では現れにくい箇所に着目でき、効果的な対策を織り込むことができた。

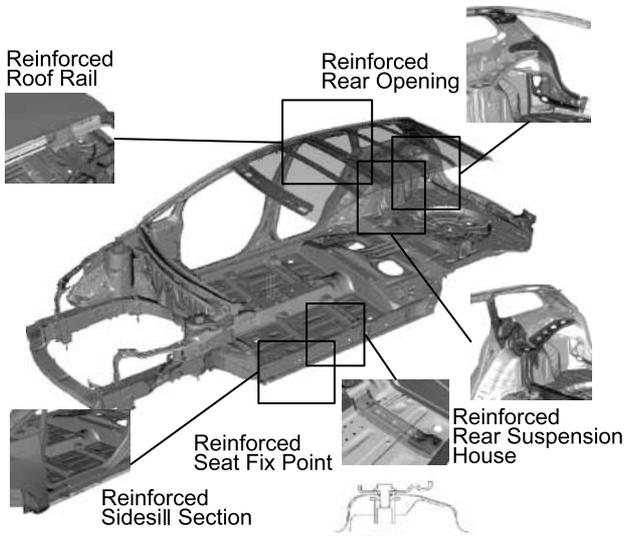


Fig.6 Rigidity Measures

3.2 NVH開発

(1) NVH開発のカスケード

CX-7では、Zoom-Zoomな走行性能と同時に、クラストップレベルのNVH性能を目標に開発を行った (Fig.7)。

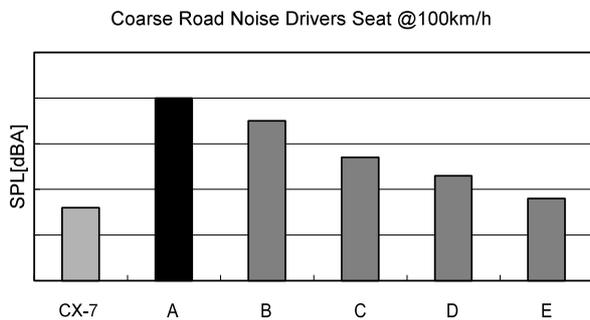


Fig.7 Road NVH Target

NVH性能は、車両全体の振動特性が影響する。特にアッパーボデーを量産金型で製作するため、図面段階でNVH性能の作りこみを行う必要があった。

CX-7では、車両システム解析を始めて車種開発に本格適用し、試作品のない図面段階で、骨格構造からパネルの制振構造 (ビードパターン) にいたるまで、車両各部の振動特性の設計を行った。

(2) 車両システム解析の概要

Fig.8に示すように、車両システム解析とは、シャシー、車体、そして車室内の空洞モデルを組み合わせたモデルであり、それに実走時相当の入力を与えて、試験路走行時の車内音を計算上で再現する手法である。この手法では、車内騒音を予測すると同時に、その悪化に対して寄与の高い入力源や放射源、その変形モードを特定することができる。

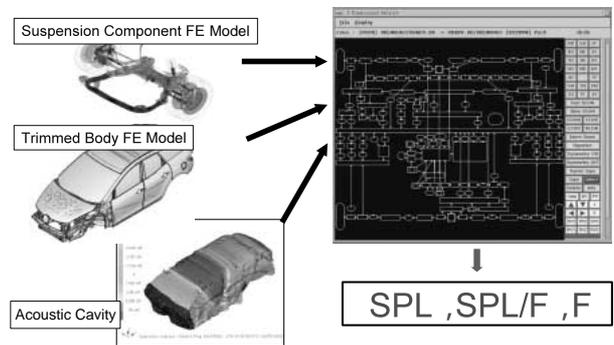


Fig.8 Vehicle System Analysis

(3) 車両システム解析の適用

本手法を実際にCX-7で活用した事例を示す。

① シャシー開発

CX-7では、リヤにマルチリンク・サスペンションを採用しているが、リヤ入力に起因する車内音のピークが認められた。リヤサブフレームの振動モードを詳細に分析した結果、Fig.9に示すように、リヤサブフレームが前後に「ゆりかご」状に振動するモードと、デファレンシャルギアを支持する屈曲部の曲げ変形が主要因であると判明した。対策として、サブフレーム本体の補強に加え、車体への支持点を増やし、7点マウントを採用した (Fig.10)。

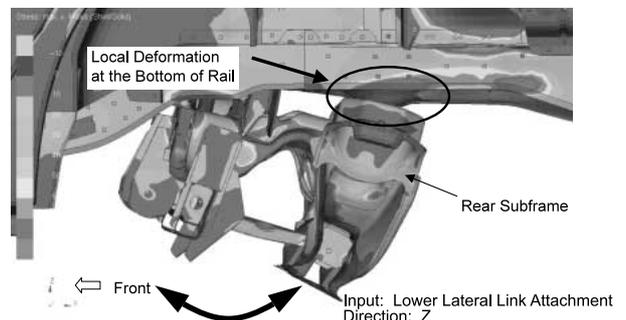


Fig.9 Forward and Back Movement of Subframe

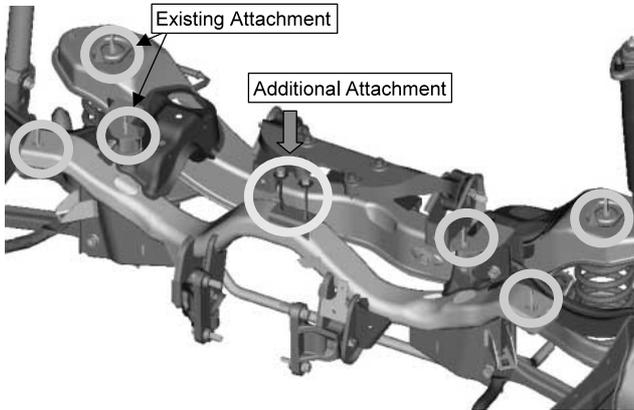


Fig.10 Seven Point Mounts

② 車体開発

CX-7では、車両システム解析を、車体骨格やパネルの詳細設計にも適用した。Fig.11はアッパーボデーの初期設計段階におけるロードノイズの解析結果である。リヤピラー部やフロアの振動が、車内音を悪化させる懸念があることが分かった。車体の振動モードを詳細に分析した結果、ホイールハウス周辺を起点として、リヤピラーが内倒れるモードと、リヤシート付近のフロアが、局部的に上下振動するモードの影響を確認した。不要な重量アップを極力排除するため、ビード形状の最適化により、ボデーパネルの共振特性をコントロールした。Fig.12に対策前後による改善効果を示す。

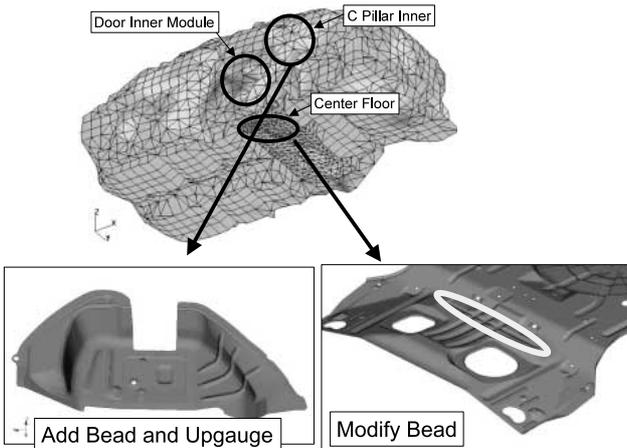


Fig.11 CAE Result and Countermeasures

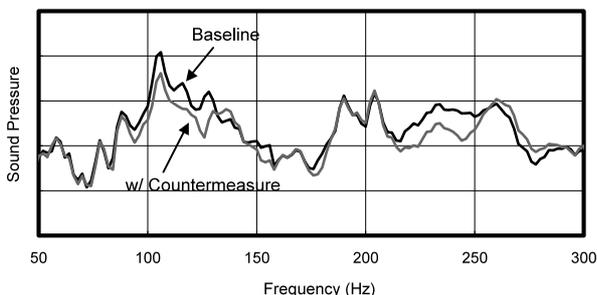


Fig.12 Improvement of Sound Pressure

3.3 衝突安全

(1) 前面衝突性能

前面衝突性能では、前方からの衝突エネルギーを客室にいたるまでに吸収または分散させ、客室へのダメージを抑えることが重要である。Fig.13にCX-7の構造を示す。ボデー全体の軽量化と高い衝突性能を実現するため、フロントサブフレームにペリメータ構造を採用し、フレーム前方でのエネルギー吸収を増やした。更にペリメータフレームとフロントフレームを6点マウントとすることで、フロントフレームの持ち上がりを抑制し、キックアップとフロントフレームでつくられるトラス構造で前方からの衝突エネルギーをしっかりと受け止める構造としている (Fig.14)。

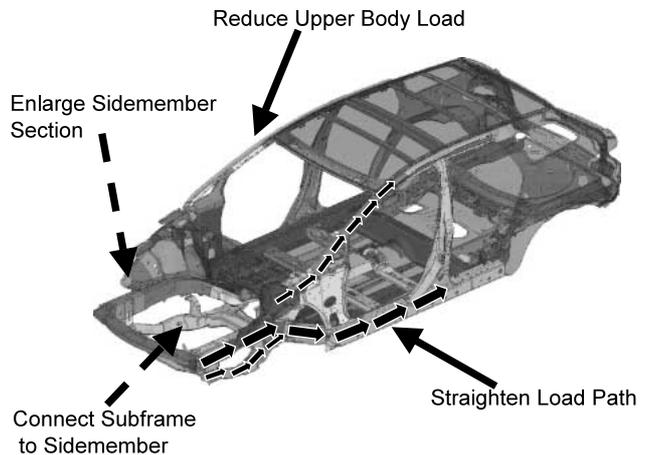


Fig.13 Front Impact Structure

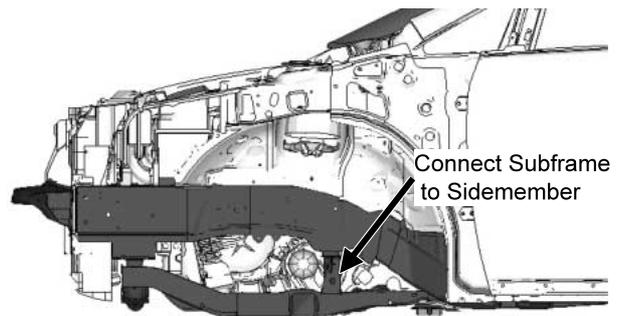


Fig.14 Front Frame Structure

この構造により、衝突性能とショートオーバハング、軽量ボデーの両立を実現できた。

(2) コンパチビリティ対応

車対車による衝突において、相手車両に対する加害性を緩和するために、CX-7ではペリメータフレームを適切な位置に配置し、衝突時に乗用車への乗り上げを防ぐ構造としている (Fig.15)。お互いのフレームがすれ違わない構造となっており、相手車両の変形も少ないことがわかる。

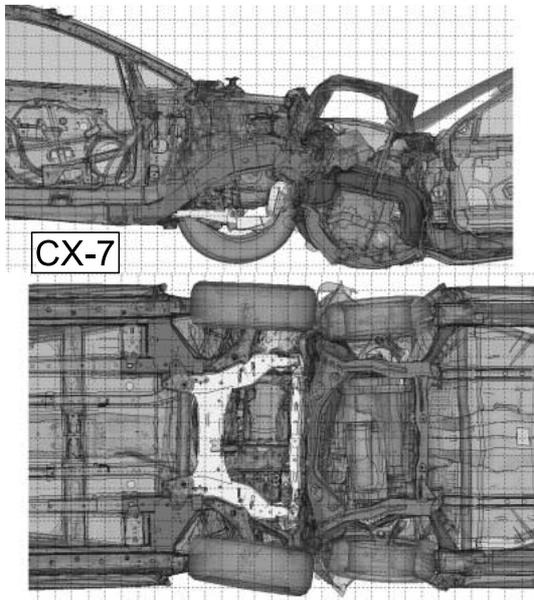


Fig.15 Compatibility CAE

(3) 側面衝突性能

側面衝突性能では、側方からの衝突エネルギーを乗員や燃料タンクまでの非常に限られたスペースのなかで吸収または分散させ、客室へのダメージを抑えることが重要である。とくにIIHS側突は、従来の米国NCAPにくらべてバリアの衝突位置が高く、バリア形状が凸型で硬いため車体にとって厳しい衝突モードである。CX-7はマツダの伝統であるトリプルH構造を更に進化させることで、確実に乗員を保護している。ロードパスの要となるセンターピラー、クロスメンバ、サイドシルの断面を拡大し、更にNO.2.5クロスメンバの設定、ルーフレインを3本設定することにより、衝突エネルギーをしっかりと受け止める構造としている。また、ドアとボデーのオーバーラップを大きく取り、インパクトバーの取付け位置を低くすることで、側面からの衝撃をフロアへ分散させ、ドアの進入を抑制している (Fig.16)。

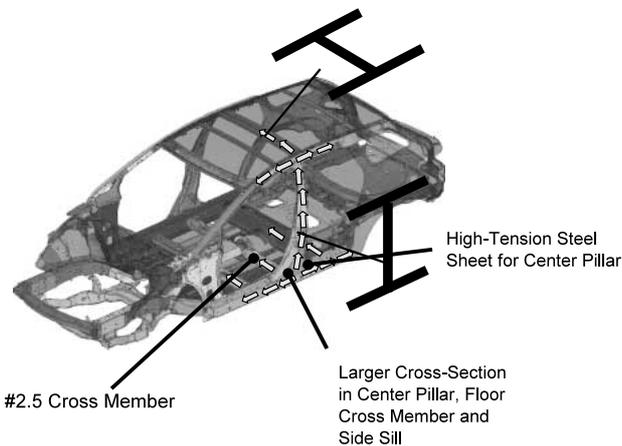


Fig.16 Side Impact Structure

(4) 後面衝突性能

後面衝突性能では、後方からの衝突エネルギーを客室、燃料タンクに至るまでに吸収または分散させ、客室や燃料タンクへのダメージを抑えることが重要である。CX-7では、高張力鋼板を使ったストレートなりヤサイドメンバを使用し、世界で最も厳しい米国の80km/hオフセット後面衝突の新規制を先取り対応した (Fig.17)。

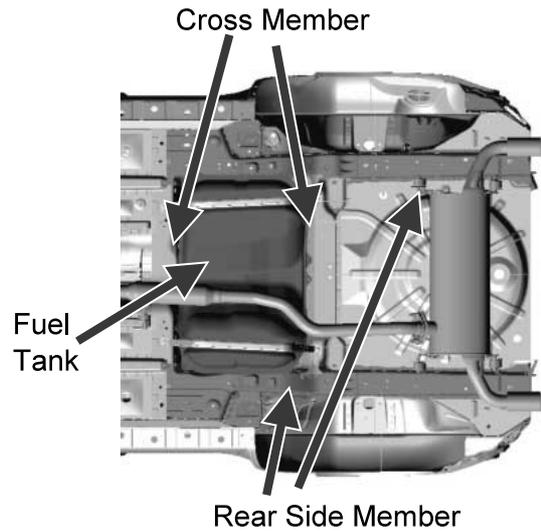


Fig.17 Rear Impact Structure

(5) ロバスト性の評価

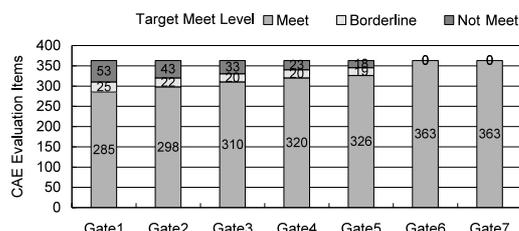
スポット破断や部材崩壊の有無は、CAE予測が難しい。また、単一条件の計算だけでは実際に起こりうる衝突時の条件や部材強度のバラツキによる現象の差を予測できず、衝突性能の低下のリスクを見逃す場合がある。そのため起こりうるバラツキ要因を整理し (Fig.18)、この表をもとにスポットや材料強度、あるいは衝突速度・バリアとの当たり位置といった解析条件を変化させるといった数多くのケーススタディを実施することにより、ロバスト性の高い構造を図面に織り込んだ。

対象	対象	考えられる要因	評価項目	仕様	実績	備考
フロント乗員保護 (乗員の保護)	センターピラーの断面 (材質、形状) バリアピラーの形状位置	バリアピラー	断面形状	断面形状	○	
			断面形状	断面形状	○	
	フロント乗員の保護 (材質、形状) フロント乗員の保護の中心位置	フロント乗員	断面形状	断面形状	○	
			断面形状	断面形状	○	
	フロント乗員の保護 (材質、形状) フロント乗員の保護の中心位置	フロント乗員	断面形状	断面形状	○	
			断面形状	断面形状	○	
	リア乗員保護 (中・小乗員の保護)	リア乗員	断面形状	断面形状	○	
			断面形状	断面形状	○	
			断面形状	断面形状	○	
			断面形状	断面形状	○	
			断面形状	断面形状	○	
			断面形状	断面形状	○	
			断面形状	断面形状	○	
			断面形状	断面形状	○	
			断面形状	断面形状	○	
			断面形状	断面形状	○	
	バリア乗員保護	バリア乗員	断面形状	断面形状	○	
			断面形状	断面形状	○	
			断面形状	断面形状	○	
			断面形状	断面形状	○	
断面形状			断面形状	○		
断面形状			断面形状	○		
断面形状			断面形状	○		
断面形状			断面形状	○		
断面形状			断面形状	○		
断面形状			断面形状	○		
フロント乗員保護	フロント乗員	断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
バリア乗員保護	バリア乗員	断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		
		断面形状	断面形状	○		

Fig.18 Robustness Examination Chart

### 4. CAE適用結果

以上のように、車体骨格を決める上で重要な3性能について、CAEをフル活用して車体構造の構築に努めた。それぞれの性能に関して、CAEが中心となって性能の横通しを行い、正式図に至る段階的な図面（CADデータ）の更新に併せて、モデルを更新し、性能を育成し詳細設計を推進した。Fig19に示すように各更新のフェーズ毎に、CAE結果のゲートレビューを設け、最終的な正式出図までに、各性能に目標達成の見通しをつけることができた。実車テストによる評価でも目標達成確認し、早い段階でスムーズに開発を完了した。



Target Meet Level	Target	80%	80%	90%	95%	95%	100%	100%
Result		76%	82%	85%	88%	90%	100%	100%
CAE Completion Level	Target	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Result		100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fig.19 Gate Status Chart

### 5. おわりに

ゼロプロトへの挑戦というテーマに対して、チームとして一丸となって取り組んだが、これまでの開発と比べて、特別なことをしたとは思っていない。CAEエンジニアとして、開発してきた新技術を積極的に取り入れ、CAE評価できる項目は漏れのないように実施し、詳細設計の要として、デイリーに設計/実研チームと進捗状況の情報交換を行った。結果、最終的に狙い通りの高い品質・性能を持った車が開発できたと自負している。現時点、全ての評価がCAEのみで可能となっているわけではないが、今後もCAE技術を進化させてより良い商品をお客様に提供していきたい。

### 参考文献

- (1) 江頭ほか：ベリーサ開発におけるCAE適用技術の紹介，マツダ技報，No.23，p.53-57（2005）

### 著者



杉本 繁



上野正樹



菊池 荘吉



藤川孝司



大原 司