

特集：安全

29

衝突安全開発における CAE の進化

Evolution of CAE Technology in Crash Safety Development

河野 勝人*1

Katsuhito Kouno

上野 正樹*4

Masaki Ueno

朝日 龍介*2

Ryusuke Asahi

小島 宏介*5

Kosuke Kojima

杉本 繁*3

Shigeru Sugimoto

花田 裕*6

Yu Hanada

要約

マツダでは「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」を持つ商品の開発を目指している。その中で、衝突安全開発においては、安全性能と軽量化という背反する課題を高次元で両立させるために、CAE (Computer Aided Engineering) を駆使して車両構造を開発している。SKYACTIV-ボデーに代表される車体開発においては、高精度な CAE モデルを用いて、衝突荷重を効率的に分散させるマルチロードパスコンセプトを採用した新しい構造を作り上げた。更に、この車体モデルと高精度なダミーモデル、内装・拘束装置モデルを組み合わせ、車体変形挙動から乗員傷害値まで予測可能な CAE 技術を開発した。この技術を CX-5 開発にフル適用し、世界トップレベルの衝突安全性能を実現した。

Summary

To develop a vehicle that offers “driving pleasure” and “excellent environmental and safety performance”, we made full use of CAE (Computer Aided Engineering) in developing crash safety performance, with an eye to achieving two conflicting targets: A high level of safety performance and weight reduction. In developing the new vehicle structure, which is represented by SKYACTIV-BODY, we analyzed the loads transferred to each part of the body by use of highly accurate CAE models. This led us to develop a “multi-load path” structure in which loads are dispersed across multiple parts of the body. In addition, by a combination of this body model, high-precision dummy model, and interior and restraint system model, we developed a CAE technology that makes it possible to even predict body deformation behavior and occupant's injury value. By fully applying this technology to the CX-5 development, we were able to achieve a world's top-level crashworthiness.

1. はじめに

マツダでは、技術開発の長期ビジョンである「サステイナブル “Zoom-Zoom” 宣言」に基づき、マツダ車を購入いただいた全てのお客様に「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」の提供を目指して商品開発を行っている (Fig.1)。それを具現化したのが現行デミオ以降導入している SKYACTIV 技術である。特に CX-5 以降では、クリーンディーゼルに代表される新世代のパワートレイン技術と並んで、世界トップレベルの衝突安全性能とクラストップの軽量化を両立する SKYACTIV-ボデーを開発し、これから

順次新型車に展開していく予定である。

SKYACTIV-ボデーの開発においては、衝突安全性能と軽量化という背反する課題を高次元で両立させるために設計段階で徹底的に CAE による検討を行い、車体構造を最適化させた。具体的には、衝突エネルギーを無駄なく車体各部に伝達・吸収させるために、フレームの配置や形状の最適化や高張力鋼板の適用領域拡大の検討を行った。更に衝突時の乗員保護のため、車体変形を分析した上で、乗員に伝わる衝撃を吸収するインパネやトリムなどの内装部品、乗員の挙動をコントロールするシートベルトやエアバッグ

*1~4 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

*5, 6 NVH 性能・CAE 技術開発部
NVH&CAE Technology Development Dept.

などの拘束装置の設計にも CAE 技術を適用することにより車両全体で世界トップレベルの安全性能を実現している。

本稿では、マツダの衝突安全性を支えている最新の CAE 技術について報告する。

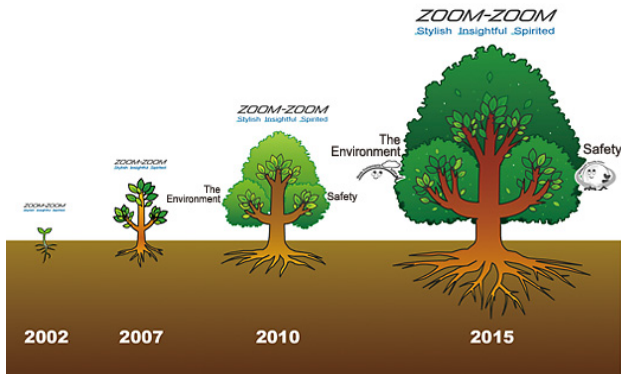


Fig.1 Defining Sustainable Zoom-Zoom

2. 衝突性能開発の概要

自動車の衝突現象は、Fig.2 に示すように車体系と内装系の 2 つに大別できる。自動車の持つ運動エネルギーは車体の変形により吸収され、この際に車体の減速度や各部の変形が内装部品を介して、乗員に伝わることで乗員傷害値を発生させる。乗員を保護するには、意図した車体の変形により、乗員の挙動をコントロールし、最終的には、乗員へのダメージを最小限に抑えることが重要である。このため設計段階で CAE をくり返し、車体の構造や内装部品、拘束装置の仕様を緻密に設計している。

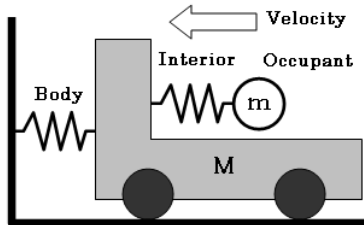


Fig.2 Kinematics Model of Front Impact

3. 車体解析の高精度化

車体の設計においては、衝突過程で車体の各部が時々刻々どのように潰れ、乗員にいかにか減速度や力を伝達するのかを CAE で正しく予測することが必要である。マツダでは非線形解析ソフト LS-DYNA (LSTC-Livermore Software Technology Corp., 米国) による大規模有限要素モデルを用いて車両開発を行っている。CAE の高精度な予測を実現するポイントは、モデルの精密な作りこみである。車体各部の変形形態 (曲げ変形, ねじり変形) や潰れ量をモデル上で再現するためには、詳細な有限要素 (以下, メッシュと呼ぶ) を用いて、潰れの起点となるピード・座面などの形状の不連続や、部材の断面変形を正確に再現することが重要である。メッシュサイズに関しては、小さくするほど部品の形状再現性が向上する反面、要素数の増大と

計算の時間きざみ (タイムステップ) の短縮を招き、計算時間の増大に直結する。この問題に関しては、社内のスーパーコンピュータを継続的に増強し、計算処理能力を向上させることにより解決している。ちなみに、マツダが衝突 CAE を開始した 1990 年代初頭ではメッシュサイズが約 100mm でモデルの総要素数が数万要素程度だったのに対し、現在ではメッシュサイズは 3~7mm まで詳細化し、総要素数も 300~400 万要素まで大規模化している (Fig.3)。

また、近年軽量化の要求から、車体を構成する鋼板材料も多様化している。成形性に優れた低炭素鋼から、高強度な高張力鋼板まで、部位により適切に使分けられている。これら鋼板の材料特性を正しくモデルに反映させることが重要である。そして、衝突現象で特有となる、過大な入力による溶接点や部材の破断リスクを高精度に予測するモデル化技術を組み合わせることで、軽量でありながら高強度な車体の設計を実現している。

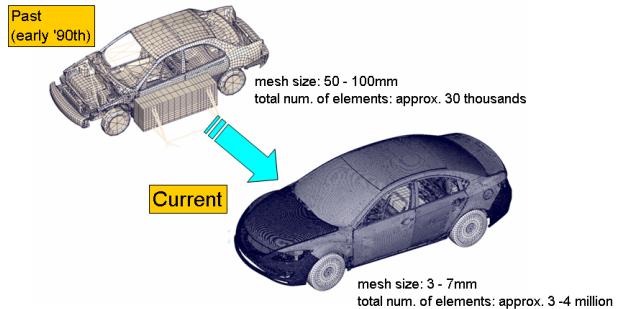


Fig.3 Improvement of CAE Model

4. 乗員傷害値評価技術

前章で述べた高精度な車体解析モデルをベースに、乗員傷害値の予測を可能にした技術を紹介する。

4.1 乗員ダミーモデル

衝突テストでは、各種体型や性別に応じたダミーを用いて、衝突過程での乗員の挙動と、乗員の各部に発生する入力や加速度を計測し、乗員傷害値を評価している。乗員傷害値を CAE で精度よく予測するためには、このダミーのシミュレーションモデルが必要不可欠であり、マツダは、LS-DYNA の高精度ダミーモデルを用いている (Fig.4)。このダミーモデルでは、内部の構造や各ジョイント部の特性まで詳細かつ正確に再現されており、高精度な内装部品や拘束装置モデルと組み合わせ、更に前述の車両モデルに組み込むことにより衝突過程でのダミーの挙動ならびに乗員傷害値を定量的に予測し、これを低減するために最適な車体および内装の構造を開発している。

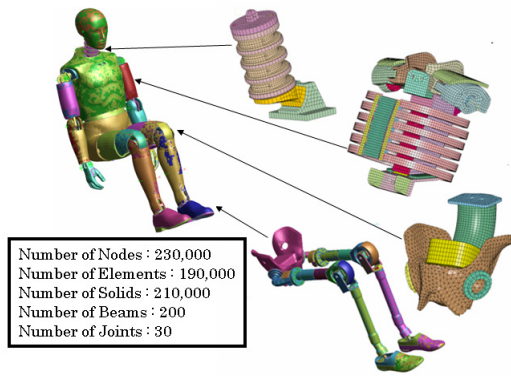


Fig.4 Dummy Model for Front Impact (Hybrid III・AM50 Model, Developed by LSTC)

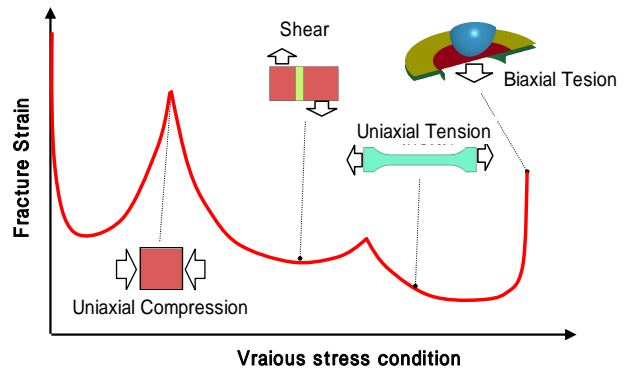


Fig.6 Relationship between Stress Condition and Fracture Strain

4.2 内装部品モデル

乗員傷害値の予測においては、ダミーを取り囲む内装部品からの影響を解析上で予測する必要がある。インパネやドアトリム、シート等は乗員に近く、衝突時にはダミーと接触するためダミーの挙動や乗員傷害値に直接的に影響を及ぼす。これらの内装部品の構造解析には、その主要な材料である樹脂の変形挙動を CAE 上で精度よく予測する必要がある。そのポイントは、材料特性の正確なモデル化であり、鉄鋼材料に比べはるかに高い延性特性やひずみ速度依存性を正しくモデルに考慮する必要がある。更に、樹脂部品は変形時に容易に破断を伴うため、設計段階で破断のリスクを適切に予測することが重要である。これに関しては、まず樹脂部品に特有の、各部で異なる板厚の分布を細かくモデル化するとともに、内部の補強構造であるリブのような形状の細部まで精密にモデル化している (Fig.5)。また、樹脂は発生する応力の状態により破断限界が大きく変化する特徴を持ち (Fig.6)、各要素の応力状態をもとに、破断リスクを判定する手法を開発することで、部品の詳細な構造を CAE により設計段階で決定することができるようになった。

Fig.7, 8 は、前面衝突時のグローブボックス部と膝の干渉を再現した解析結果を示す。グローブボックスを構成する部品の破断を再現することで、衝突の後半に至るまで、膝部への入力を正確に CAE 上で再現できた。

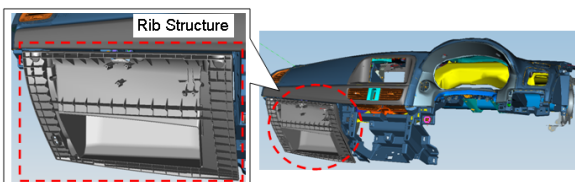


Fig.5 Instrument Panel Model (ex. Glove Box)

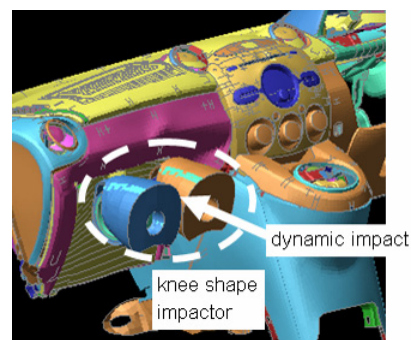


Fig.7 Instrument Panel Knee Impact Simulation

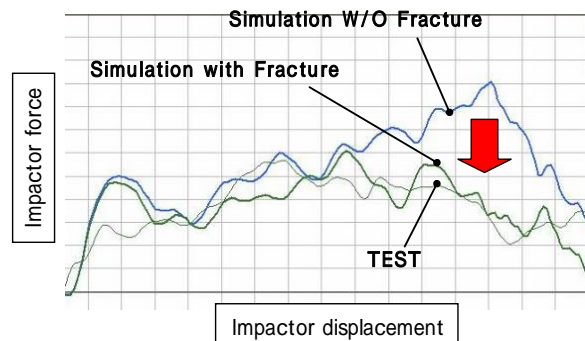


Fig.8 Simulation Result

4.3 拘束装置モデル

拘束装置とは、エアバッグやシートベルトなどの安全デバイスのことである。衝突時にダミーの挙動を制御する機能を持つ。従って、乗員傷害値に対して直接影響を及ぼすため、高度な解析精度が必要である。

衝突時にダミー挙動を制御するために、シートベルトは、衝突の瞬間にベルトを引き込むことにより乗員の拘束性を高めるプリテンションと、衝突の後半では一定荷重で伸び出すロードリミッタの機能を有している。CAE モデルにおいても実機計測で求めたベルトの引き込み、伸び出し特性を忠実に設定している。

また、エアバッグは、複数の布材を縫製したバッグの基布と、起爆して希ガスを噴出させるインフレーターで構成さ

れる。エアバッグからダミーへの入力を正しく再現するためには、内部の圧力状態を精度よく解析する必要がある。そのためには、基布やインフレータの特性が必要となる。基布の異方性を含めた伸び特性やガスの漏れ量、インフレータ特性などの基礎データを実験から求め、CAE モデルに反映している。

更に、側面衝突のようにダミーとドアトリムの狭い空間でエアバッグが展開する場合においては、展開過程でのダミーへの荷重伝達を正確に予測する必要がある。これに対しては、インフレータからのガスの流動を考慮し、エアバッグの展開順序やダミー各部への入力分布を正確に予測する粒子法によるエアバッグの解析手法を開発した(Fig.9)。粒子法はエアバッグ内部に充填するガスの分子を数 10 万～数 100 万の粒子で表現し、基布表面に衝突する粒子の運動量の変化から、エアバッグ内の圧力を計算するものである。詳細なメッシュで作成したエアバッグの基布モデルを、実物の手順に併せて折り畳み、これに粒子法を適用することで、エアバッグの展開挙動やダミー各部への入力を正確に再現できる。この技術は、後述の SKYACTIV-ボデー開発に適用した。

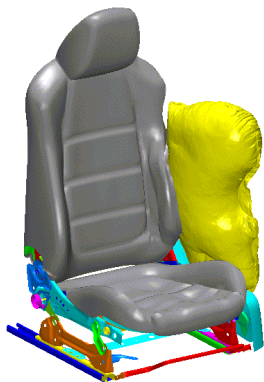


Fig.9 Simulation of airbag deployment
(動画: SAB-ANIME)

5. SKYACTIV-ボデー開発への CAE 適用事例

5.1 車体開発への CAE 適用事例

以上の CAE 技術を、CX-5 をはじめとする新世代商品群の車体コンセプトである SKYACTIV-ボデー開発に適用した事例を、前面衝突を例にして紹介する。

SKYACTIV-ボデーでは、衝突性能と軽量化を両立するために、マルチロードパスコンセプトを採用している (Fig.10)。すなわち、従来の構造では、衝突による入力はエンジンルーム内のフロントフレームを中心に吸収していたのに対し、SKYACTIV-ボデーではエプロンやサブフレームといったフロントフレーム以外の周辺部材にも荷重を分散させることで、エネルギー吸収率を上げつつ、フロントフレームやそれを支えるフレーム後部の負担を軽減することで、車体全体を軽量化するものである。

マルチロードパス構造の実現にあたっては、車体を構成するコンポーネントが、各々所定の耐力を発揮しつつ、適切なタイミングおよび順序で圧潰し、車両全体として目標のエネルギー吸収を達成することが必要である。

そのため、前述の CAE 技術を用いて、コンポーネントごとに変形形態や潰れ量に応じた荷重特性の目標を設定し、それを最軽量で実現する構造を決定した。そして、それらを車両として組み合わせた状態で目標どおりの順序で変形し、エネルギー吸収できるよう、コンポーネント間の接合強度や変形の伝達を最適化した。Fig.11 にその結果を示す。フロントフレームのみならず、エプロンやサブフレームにも効果的に荷重伝達している様子が分かる。

以上の取り組みにより、SKYACTIV-ボデーでは従来車に対して衝突性能を向上させつつ、車体全体で従来車比 8%の軽量化を実現した (Fig.12)。

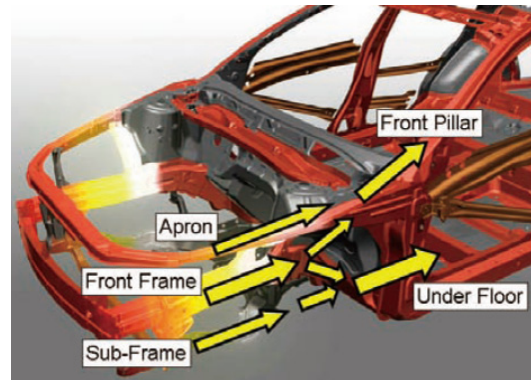


Fig.10 Multi-Load Path Concept

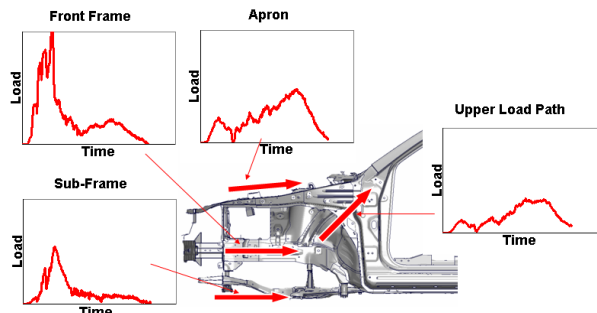


Fig.11 Multi-Load Path and Cross Section of the Frame

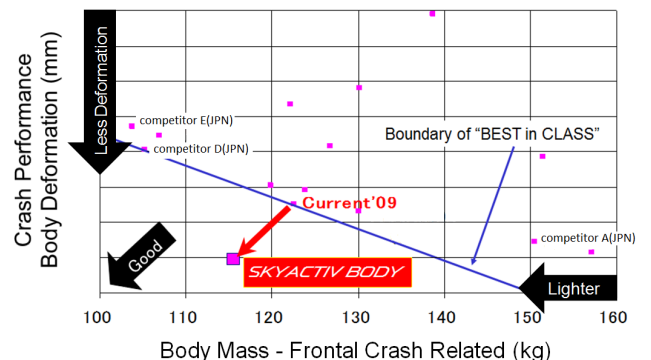


Fig.12 Body Mass and Crash Performance Comparison

5.2 内装開発への CAE 適用事例

次に、前面衝突において乗員傷害値予測に CAE を適用した事例を紹介する。Fig.13 に前面衝突の際に乗員の頭部および胸部がエアバッグとシートベルトにより拘束された状態を示す。

頸部の傷害を軽減するためには、頭部がエアバッグに拘束される際の頭部への入力制御することが重要である。CAE を活用することで、Fig.14 に示すように、衝突過程の頭部とエアバッグの接触状態を詳細に分析し、改善の検討を行うことができる。この場合、エアバッグ形状や、圧力の制御を最適化することで、Fig.15 に示すように頸部への入力を効果的に削減できた。

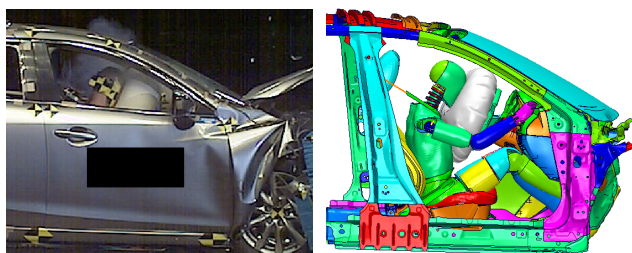


Fig.13 Comparison of H3 50%ile Dummy Kinematics Under J-NCAP Condition

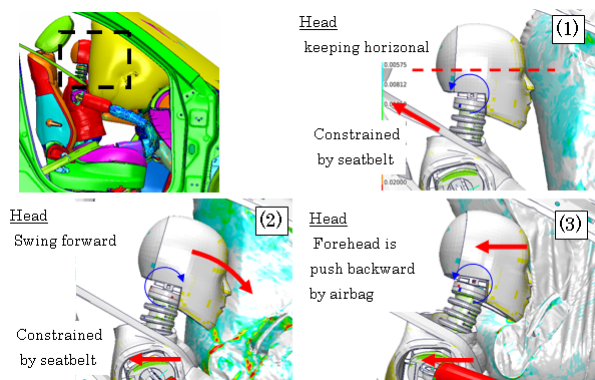


Fig.14 Analysis of Neck Injury Mechanism

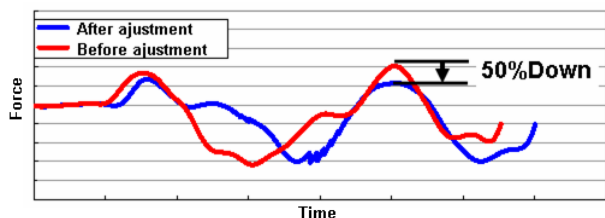


Fig.15 Improvement of Neck Injury

以上のような乗員傷害値予測技術は、前面衝突だけでなく側面や後面衝突にも適用している。その結果、CX-5 の開発においては、Fig.16 に示すように、従来車に比べ、CAE による図面段階での性能評価項目数を 270%拡大し、開発の最終段階における開発確認車による内装部品に関する設計変更要求を 70%削減させ、計画通り市場導入するこ

とに貢献した。

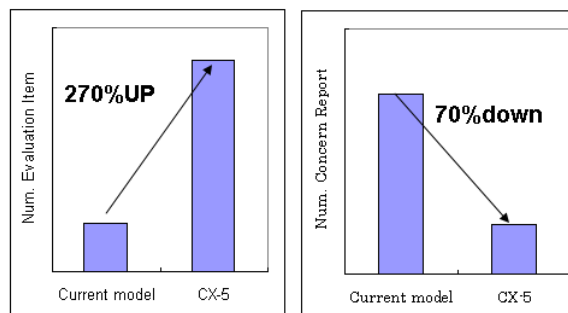


Fig.16 Improvement of Development Process

6. おわりに

高精度な車体と内装そしてダミーモデルを組み合わせ、車体変形挙動から乗員傷害値まで予測可能な CAE 技術を開発した。この技術を SKYACTIV-ボデーの開発にフルに適用した。その最初の商品である CX-5 では、すでに米国の IIHS, 欧州 NCAP で最高レベルの評価を受けている (Fig.17) (*1)。今後も高い安全性能に裏打ちされた“Zoom-Zoom”な商品をお客様にお届けするため、現状に満足することなく衝突安全 CAE 技術の進化に取り組んでいく。



Fig.17 CX-5 Safety Assessment Result (USA, Europe) (*1) 2012 年 7 月時点。

著者

