

特集：新型車 (CX-5)

20

## CX-5 SKYACTIV-BODY ストラクチャの開発 Development of SKYACTIV-BODY Structure for CX-5

木村 隆之<sup>\*1</sup>

Takayuki Kimura

田中 祐充<sup>\*4</sup>

Masamitsu Tanaka

橋本 学<sup>\*2</sup>

Manabu Hashimoto

近藤 量夫<sup>\*5</sup>

Kazuo Kondo

中内 繁<sup>\*3</sup>

Shigeru Nakauchi

岡田 義浩<sup>\*6</sup>

Yoshihiro Okada

### 要約

CX-5 は、技術開発した SKYACTIV-BODY を量産適用した最初の車である。お客様にマツダが目指すいつまでも「ワクワク」するクルマを提供する上で必要な「走る歓び」を支える高い剛性と最高レベルの衝突安全性を共存させた軽量ボデーを実現した。今回は CX-5 の開発プロセスと構造の特徴に関して、その狙いと適用技術を紹介する。

力学の原理原則から理想の構造を描き、そのコンセプトを CAE 解析やテストにより整合を取り具体的構造を決定した。また開発初期から材料低減等の VE (Value Engineering) 活動を並行して進め、全てのお客様にリーズナブルな価格で商品提供することを目指した。その結果欧州 CD プレミアムセダン並の車体剛性値と主要市場 NCAP のトップランクの安全性能を確保し、同クラスの最軽量ラインより 8%軽量化を実現した。

### Summary

The CX-5 is Mazda's first production model to adopt the SKYACTIV-BODY. Its light weight body has achieved a high rigidity that enhances "driving pleasure" and the highest level of crash safety performance, both of which support Mazda's commitment to making cars that always excite. This article introduces the development process of the CX-5 and its structural features, including the aims and the technologies applied.

Based on the basic principles of mechanics, we designed an ideal body structure and nurtured concept technologies through CAE analyses and vehicle tests before determining the structural details. In addition, we applied VE effective material utilization from an early stage of development so as to offer the vehicle to all our customers at an affordable price. As a result, a body rigidity equivalent to the level of European premium sedan of CD segment has been achieved, the crash safety performance has ranked top in NCAP of major markets, and the vehicle weight has been reduced to a level 8% lighter than the lightest line of the same segment cars.

### 1. はじめに

SKYACTIV-BODY の技術開発内容についてはマツダ技報 29 号にて報告済みである。今回 CX-5 の開発に当たり、この技術開発内容とその技術を織り込んだ車両である TPV (Technology Prove-out Vehicle: 技術検証車) の内容を量産構造に置き換える必要があった。

商品化に当たって、車型はセダンから SUV となった。

それでもセダン車型と同じ性能を求めた。技術開発段階に一括企画として SUV 車型に対応すべく車体の変更点を決定し準備を進めていたが、実際の商品仕様としては、乗員のドライビングポジション改善、フロア高さの変更、乗降性の更なる改善からサイドシル部断面の小型化など車体の基本諸元の変更に対応する必要があった。

新しいデザインテーマ「魂動」を実現しつつ、「走る歓び」を支える高い剛性と最高レベルの衝突安全性を両立さ

\*1~4 ボデー開発部  
Body Development Dept.

\*6 車両実研部  
Vehicle Testing & Research Dept.

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

せ、更に環境と運動性能に直結する軽量化を実現するといった「全ての面でベストであること」の革新的な目標を設定し、商品開発に取り掛かった。

また、収益性を確保するには円高環境に対応するだけのコスト適正化を、性能の低減なしにやり切る VE 活動が必須だった。

加えて、商品のタイムリーな市場導入のため更なる短期開発を目指した。

## 2. 開発プロセス

### 2.1 開発アプローチ

技術開発においてボデーの機能と機能量を明確にした上でボデー構造との関係を解明した。これを CX-5 の諸元に当てはめて開発を進めた。

お客様に提供する価値が最大となるべく、必要とされる機能を最大化し質量が最小となる構造を決めるアプローチとして

- 力学の原理原則から構造の理想化
- 工法選択による接合効率の向上
- 材料・板厚の適正化

に取り組み、これらの項目を CAE による解析シミュレーションを用い繰り返し検証した (Fig.1)。

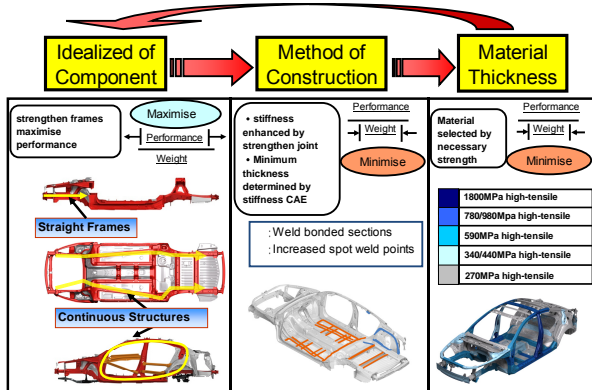


Fig.1 SKYACTIV-BODY Vision

### 2.2 基本コンセプト

- ボデーの理想の骨格を実現するためのコンセプトを
- 基本骨格のストレート化
- 連続フレームワーク
- マルチロードパス

として開発構想を立案した。しかし従来の開発では他の部品との開発タイミングにずれがあり、その既存部品の制約により理想構造が取れない場合が発生する。そこで今回の SKYACTIV-BODY の開発においては、4 番目のコンセプトとして下記に取り組んだ。

車両トータルでもベスト

開発の初期段階から企画・開発・生産の各部門が協調して従来の制約や常識を見直し、パワートレインを含めた車両全体の新規開発を同時に進めることでお互いの理想構造

を造り込み、お互いがベストの構造を ONE MAZDA の精神で決定した。

### 2.3 理想構造化のプロセス

理想構造を構築するのに当たり

- 衝突、剛性、NVH 等に対応するフレームワークの構造検証
- 機能配分量の適正化
- 品質工学による寄与度分析を用いた検証

について、同様に検証を繰り返した (Fig.2)。

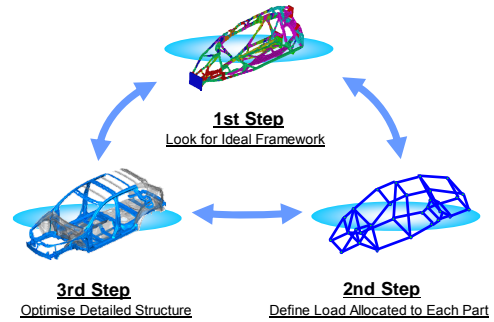


Fig.2 Development Approach

## 3. 目標性能実現に向けたボデー構造の理想化

CX-5 の構造の特徴を狙いと適用技術を含めて紹介する。

### 3.1 フロントフロア下フレーム

原理原則に基づきフロントフロア下フレームをストレートに配置し、フロントフレームとリヤサイドフレームを連続して結合する構造を発想した。しかし、自他車種をベンチマークしてもクロスカントリの一部の車種を除き SKYACTIV-BODY 構造と同じ車は存在しなかった。この発想が正しいのか CAE 解析により検証を重ねた。これまでの構造に加え様々なケースで解析を実施し CX-5 の構造が最も衝突安全性能や車体剛性に有利であることを確認した (Fig.3) (動画 B\_FRAME)。

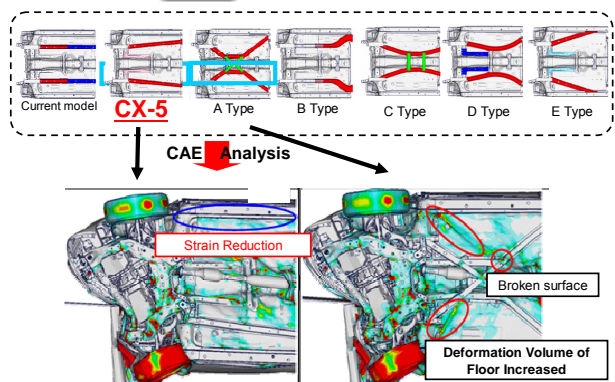


Fig.3 CAE Analysis

ベンチマーク結果を技術的に分析し、詳細構造の決定に反映した。検証を積み重ねることで、確かな開発を行った。

3.2 環状構造

ボデーストラクチャにおいて、ドアやリフトゲート部の大開口部による剛性や強度低下を、どう補うかがポイントとなる。また、サスペンションからの路面入力や衝突入力に対して入力点に適応する部材を配置するが、車両として性能目標を達成するにはその個々の部材を連続する一つの部品として機能エネルギーを上げる必要がある。

CX-5 では 4 つの部位に車体の骨格を継ぎ目なく連続する環状構造を設定し、効果的に機能エネルギーを向上している (Fig.4)。この構造によりデザイン要素にて最外面面を変動させても骨格としての強度は影響を受け難くなり、デザインテーマと性能目標の両立を実現した。

特に フロントドアからリアドア開口部にかけて設定した環状構造はフロントサスペンションとリアサスペンションのストラットユニット取り付け部をダイレクトにつながり構造となり、操縦安定性能のリニア感を向上している。

この構造の実現においては通常溶接できない鉄板接合部にウエルドボンドを施工し、既存の車体の製造設備変更を最小限に止めながら実現した。

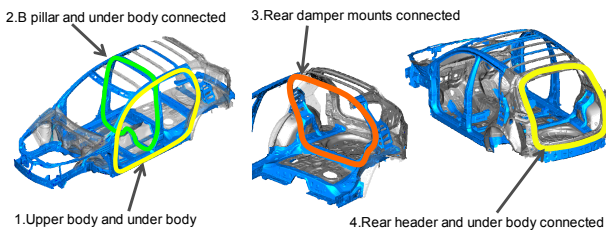


Fig.4 Continuous Structures

3.3 フロントボデーストラクチャ

SKYACTIV-BODY にて技術開発したマルチロードパス構造を CX-5 にそのまま適用することを実現した。衝突時の車両に受けるエネルギーを エブロン フロントフレーム サスペンションメンバのマルチロードパスで吸収し、土台となるキャビンの環状構造でしっかりと支えることで、乗員生存空間を確保した。従来車では厚板となっていたフロントフレームの板厚を下げることで軽量化した (Fig.5)。

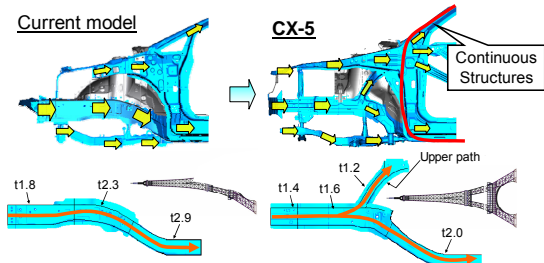


Fig.5 Front Body Structure with Multi-Load Path

3.4 デュアルブレース

(1) 車体剛性における各車体部品の寄与度分析

「走る歓び」に不可欠な操縦安定性を支える車体剛性値の向上に向けて品質工学の手法を用いて各車体部品の寄与

度を分析した (Fig.6)。その結果リアフレームやリアホイールハウス、リアサスペンションハウジング部の寄与度が高いことが判明した。

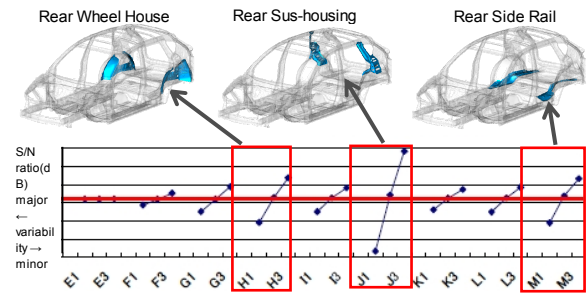


Fig.6 Contribute Significantly Analysis

しかしながらこれらの部品構造を 0 (ゼロ) から見直すことは既存の機能を失うリスクが高い。また、いたずらに板厚を厚くすることは、質量増加に直結し軽量化に相反する。

(2) 新構造の発想と具体化

寄与度の高い部品の結合強度を上げることで、相乗効果により効果的に車体剛性の向上を実現した。

具体的な構造の発想においては鳥居の足部構造などを参考にしながら、リアサスペンションの固定部に合わせて寄与度の高い部品を効果的に結合するデュアルブレース構造を開発した (Fig.7)。本構造により、質量を犠牲にすることなく、信頼性の確保と車体剛性の向上を実現した。

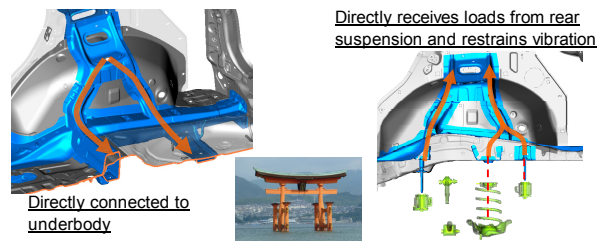


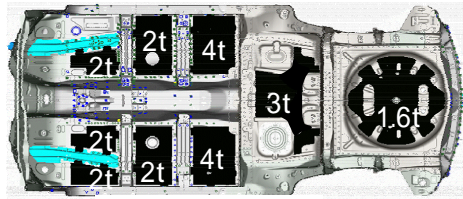
Fig.7 Dual Brace

3.5 塗布型制振材

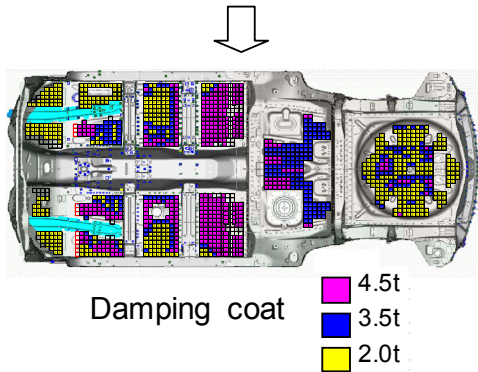
軽量化と生産性改善を目的に、フロア制振材を制振シートから塗布型制振材へ切り替えた。

CX-5 では、フロア形状を決めた上で、CAE 解析での最適化計算により、従来制振材と同等のフロア振動特性となる塗布パターンを導き出した。ただし、この振動特性の最適化だけでは、重量軽減による透過遮音性能が悪化するため、SEA (Statistical Energy Analysis) 解析と実機検証による遮音性能の寄与度分析結果から、性能を満足する塗布パターンを決定した (Fig.8)。

その結果、ロードノイズ性能をキープした上で、従来制振材比 2.4kg 軽量化を実現した。



Damping sheet



Damping coat  
 4.5t  
 3.5t  
 2.0t

Fig.8 Setting Range

3.6 アンダークロスメンバ

CX-5 では人間が体が剛性感を感じる部位にこだわって構造を工夫した。特にエンジンの排気効率向上のために大きくなったトンネル部に関しては変形量を抑えるアンダークロスメンバを設定した。当部位の適正化についてはCAEにより、まず動的な模擬解析を行いサスペンションからの入力を求め、それをボデーモデルにインプットし変形の検証を繰り返した (Fig.9)。

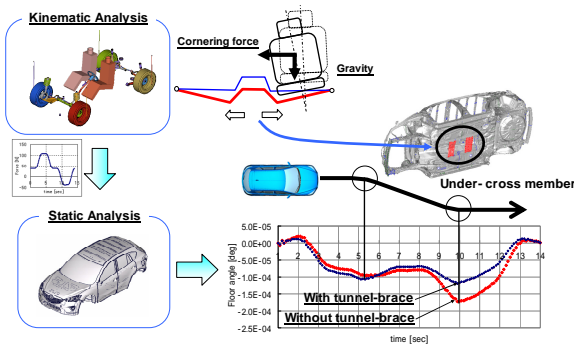


Fig.9 Under-Cross Member

3.7 空力性能向上構造

新しいデザインテーマ「魂動」を実現しつつ、環境と運動性能に直結する空力性能に向上を目指し、世界トップレベルの低 Cd プラットフォーム実現に取り組んだ。車両周りの流れの解析を行い、後流の上下の流れを制御して1カ所に集約させることによって、車両後部の乱流・渦の発生を抑制し、空気抵抗を大幅に低減するコンセプトを構築し、「その流れを実現するための構造の具体化」を実施した。

その結果、Fig.10 に示す、車両後端部の空気の流れを持ち上げる形状として、Fig.11 に示すフロア部・トンネル

部・タイヤ周り等の空気の流れを制御するアンダーカバー形状を見出した。

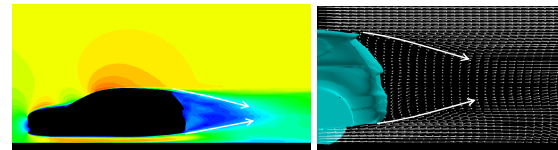


Fig.10 Aerodynamics Performance

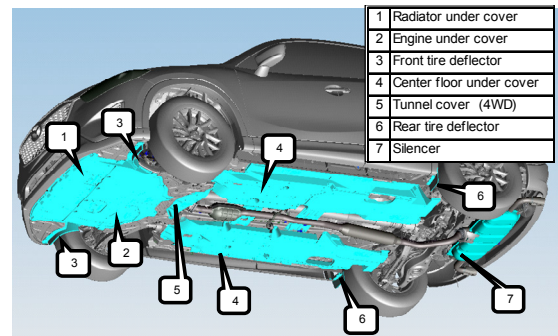


Fig.11 Under Cover

3.8 バンパレインの軽量化

ハンドリングのこだわりの一つとしてヨー慣性モーメントの低減を目指した。車両の前後端に位置するバンパレインの軽量化に取り組んだ。衝突時にエネルギーを吸収する必要機能を維持しながら薄板化して軽量化させるため、世界初となる 1,800MPa のホットスタンプ工法と材料を含め開発した。熱した鉄板をプレス加工と同時に冷却し焼き入れを行うホットスタンプ工法に対して開発を行い、エネルギー吸収性、プレス加工性と焼入れ性の全てが成立する部品構造を決定した。その結果約 4.8kg 軽量化しながら性能を満足した (動画: REINF\_BUMP)。

4. VE 活動

4.1 歩留まり向上活動

板金部品は、そのコストの約 60%が材料費である。製品品質を原板材料で割った数値を歩留まりと呼ぶ。通常は歩留り 60%程度であり、残り 40%は溶かしてリサイクルするが追加のエネルギーとコストを要する。CX-5 では開発の初期から歩留まり向上を意識した活動を実施した。一品一品の形状を吟味し個々の歩留まりを向上させるとともに、同じ板厚・材料の部品を集めて一枚の材料を無駄なく活用した。また、これまで捨てていた材料から違う製品を加工する残材活用や、部品の穴で別部品を同時加工する孫取り等を屈指し、ドアやリフトゲートなどのリッド部品を含め歩留まり 70%を実現した。

4.2 設備投資のミニマム化

溶接工程数の削減や金型数削減にも取り組み、設備投資を抑制した。例えば溶接工程では、部品の組み合わせにより、これまでは溶接作業を複数回に分けて行っていたが、1工程で溶接を可能とする構造に見直し、溶接機への投資を削減した。また、プレス加工では、複数回プレスして成形していたものを、形状工夫によりプレス回数を削減し、金型数を削減した。

5. CAE の取り組み

SKYACTIV-BODY から CX-5 での変更部位に注力し、性能確認を行いながら、材料歩留りや生産性を考慮した詳細設計を行っていくため、プラットフォーム開発の段階で3回、トップハット開発の段階で4回のCAE検証を実施した (Fig.12)。

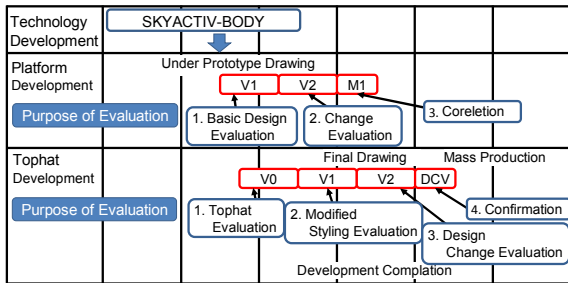


Fig.12 CAE Application Process

ここでは、CAE 検証の回数は従来の車種開発と同じとしながら、モデル作成の効率化や評価期間の短縮により、車体の金型作製に着手するまでのタイミングを早めている。また、プラットフォーム開発では試作車によるテストを行っているが、トップハットは量産金型を使った開発確認車での性能確認であり、CAE をはじめとした机上検証により詳細仕様を決定している。

取り組みの事例として、高剛性ボデー開発におけるリフトゲート開口部構造の改善について述べる。この部位はリヤサスペンションへの上下入力や旋回時の左右力を受けることにより、開口部の対角線が伸び縮みする変形が起こる。クルマとの一体感を実感できる走りや思いのままのコーナリングを実現するためには、この変形を小さく抑えていく必要がある。開発初期の CAE 結果より、環状構造による基本骨格の大幅な改善が見られるものの、断面の稜線やコーナーの R 止まり部、SW 接合のための作業穴などの詳細な箇所にも弱点部があることが分かったため、構造改善の CAE 検討を繰り返し実施しながら設計仕様を決定していった (Fig.13)。また、剛性アップによる質量増加を抑えるために、板厚感度解析や最適化などの CAE 手法を用いながら詳細設計を進めることで、車体構造の効率化を実現している。

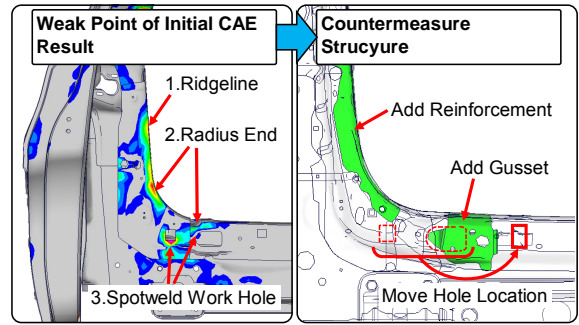


Fig.13 Rigidity Structure Improvement

6. 結果

6.1 車体剛性値

SUV の同セグメントにおいてトップクラスであり、欧州の CD クラスのプレミアムセダンと同レベルのねじり剛性値と軽量化指数を達成した (Fig.14)。

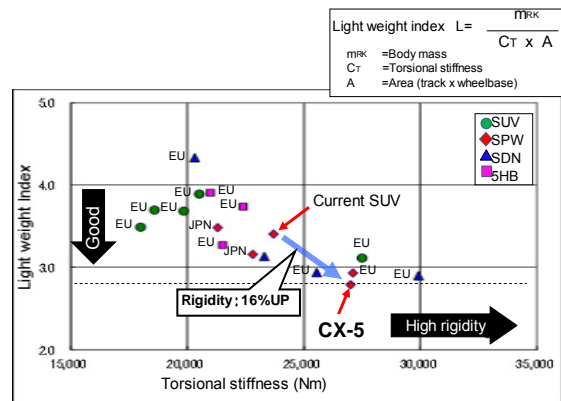


Fig.14 Light Weight Index

6.2 衝突安全性能

主要市場の NCAP を網羅的対応し、Euro-NCAP の 5 星獲得を皮切りにトップランクを獲得予定である。更に米国 IIHS (道路安全保険協会) による衝突安全試験で最高評価の「トップセーフティピック 2012」を獲得した。

6.3 軽量化

これまでに紹介した構造見直しや材料見直しにより、従来車から比べて 10% (36kg) 軽量化した。これは CX-5 と同セグメントの最軽量ラインより 8%軽い数値である (Fig.15)。

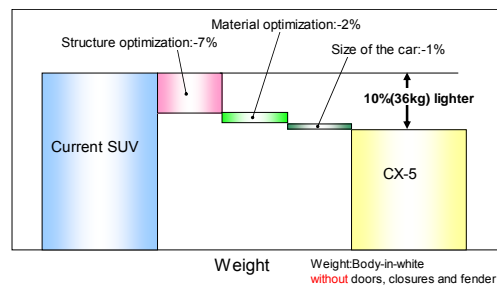


Fig.15 Weight Reduction

## 6.4 空力性能

SUV セグメントにおいてトップクラスの Cd 値と低リフト値を達成した (Fig.16)。

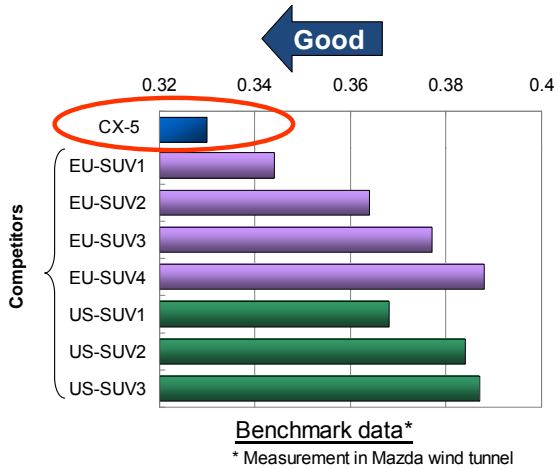


Fig.16 Aerodynamics Performance

## 7. おわりに

「技術があればできるはず」の精神で現時点では全ての面でベストな車体構造を実現した。今後も更なる技術のブラッシュアップを行い、全てのお客様に技術の進化を感じていただける商品を提供する所存である。

## 参考文献

- (1) 木村隆之ほか:SKYACTIV-Body, マツダ技報, No.29, pp.61-67 (2011)

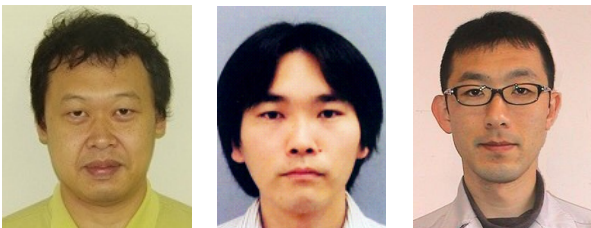
## 著者



木村 隆之

橋本 学

中内 繁



田中 祐充

近藤 量夫

岡田 義浩