

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

10

SKYACTIV-シャーシ
SKYACTIV-CHASSIS

山本 忠信*¹ 井 芹 晴 明*² 東 裕 章*³ 江 島 勝 美*⁴
 Tadanobu Yamamoto Haruaki Iseri Hiroaki Higashi Katsumi Ejima
 望 月 浩 孝*⁵ 渡 邊 雅 哉*⁶ 安野谷 知 城*⁷ 開 原 真 一*⁸
 Hirotaka Mochizuki Masaya Watanabe Tomoki Anotani Shinichi Kaihara

要 約

SKYACTIV-シャーシでは、走る喜びの更なる進化と環境性能に貢献する大幅な軽量化を実現した上で、「人馬一体のドライビングプレジャー」と「走りの質」を向上させるために、一体感・安心感・快適性の間に存在する背反性能を高次元で両立する（ブレークスルー）技術開発に取り組んだ。結果、サスペンションとステアリング領域では「中低速域の軽快感と高速安定性の両立」「中低速域の軽快感と乗心地の両立」「軽量化とダイナミクス性能の両立」のブレークスルー技術を、ブレーキ領域では「軽量化と冷却性の両立」と「効きと静粛性の両立」のブレークスルー技術を確立しながら、シャーシ全体で現行Mazda6クラス比14%の軽量化を実現した。

Summary

In the development of SKYACTIV-CHASSIS, in order to enhance “driving pleasure of oneness with the vehicle” and “driving quality” while reducing the weight significantly so as to support the environmental friendliness, technological breakthrough was pursued for achieving conflicting attributes at the same time: the oneness with the vehicle, stable & safe, and comfort. With new suspension and steering, compatibilities between “agility at low-mid range and stability at high speed”, “agility at low-mid range and ride comfort”, and “weight reduction and dynamic performance” were accomplished, and with new brake system, compatibilities between “weight reduction & thermal control” and “effectiveness and NV” were achieved while reducing the weight of chassis components by 14% compared with the current Mazda6.

1. はじめに

SKYACTIV-シャーシは走る喜びの更なる進化と環境性能に貢献する大幅な軽量化を実現した上で、

- (1) 「人馬一体のドライビングプレジャー」の向上
- (2) 快適性や安心感改善による「走りの質」の向上

を実現するために、サスペンション、ステアリング、ブレーキの機能を徹底的に見直すことによる一体感・安心感・快適性の間に存在する背反性能を高次元で両立 (Fig.1) することを目標とした。

本稿では新開発したサスペンション・ステアリング・ブレーキの構造と特徴、達成した車両性能・システム特性について紹介する。

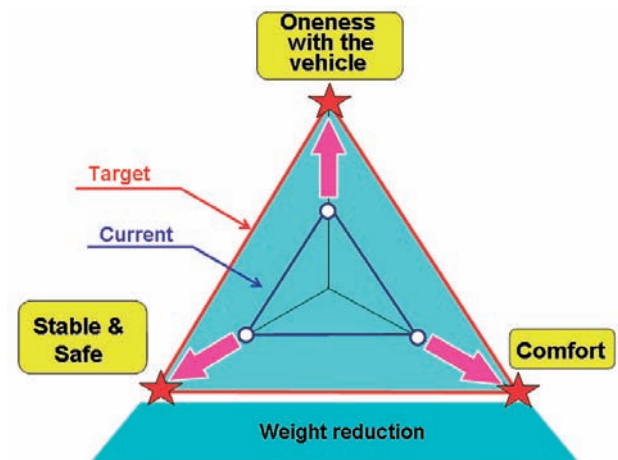


Fig.1 Development Target

*1~3 シャーシ開発部
Chassis Development Dept.

*4 ボデー開発部
Body Development Dept.

*5~8 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

2. サスペンション・ステアリング

2.1 技術の狙い

サスペンション・ステアリングでは、一体感・安心感・快適性を高次元で両立させるために、

- (A) 中低速域の軽快感と高速安定性の両立
- (B) 中低速域の軽快感と乗心地の両立
- (C) 軽量化とダイナミクス性能の両立

をブレークスルーすべき技術課題として設定した (Fig.2)。

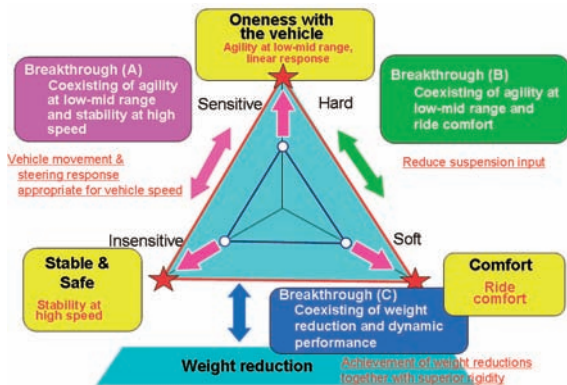


Fig.2 Trade off & Technical Subject

2.2 開発のアプローチ

走行フィーリングのカラクリ解明に基づいた運動性能目標を、性能GVE活動を通じて最適なシステム特性に機能配分した。同時に、転写性を確保し競合力のある多品種生産を可能とするコモンアーキテクチャ構想と、同体質ライン化によるボリューム効率を高めるフレキシブル生産をサポートできるように、最適な構造・工法・材料を選定した。

2.3 ブレークスルー技術

2.3.1 (A) 中低速域の軽快感と高速安定性の両立

2.3.1.1 車速に適応した車両運動の実現

中低速域でのステアリング操作に対する軽快感、および高速域の安定性をより高い次元で両立させるために、車両特性であるヨーゲイン (車両の旋回速度) を中低速域では高く、かつ高速域では低くすることを目指した。更にヨーレイト (自転運動) に対する横加速度 (公転運動) の遅れを減らし安定性を高めることを目標とした。

まずは高速域でのヨーゲインを下げ安定性を向上させるために、リヤサスペンション特性変更により後輪のコーナリングパワーを増加させる必要がある。そこでサス横剛性の低下を最小限に抑えながらサスペンションコンプライアンスステップを効果的に発揮できるようリンク配置を最適化した (Fig.3)。更にタイヤからの上下方向入力にサスクロスマウントブッシュに入る点に着目し、ブッシュのヒステリシス特性を低減し、後輪の荷重移動タイミングを早めた (Fig.4)。加えて、中低速域のヨーゲインを高めるためステアリングギヤレシオを高速化した。

これらの施策により、目標とした各速度域のヨーゲイン特

性、およびヨーレイトに対する横加速度の遅れの低減を達成し、中低速域の軽快感と高速度域の安定感を従来を上回るレベルで両立させた (Fig.5, 6)。

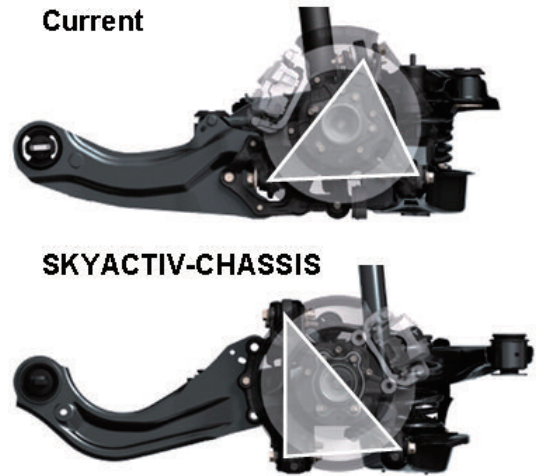


Fig.3 Optimization of Link Layout

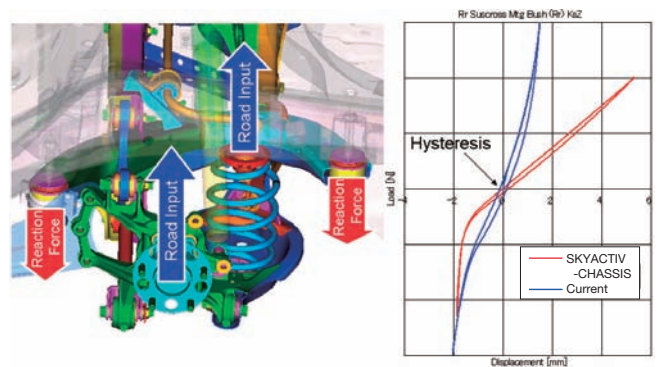


Fig.4 Input to Mounting Bush & Characteristic

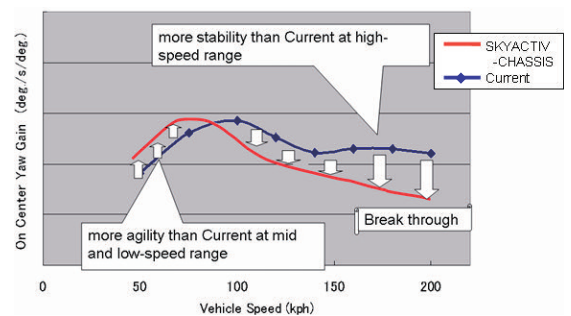


Fig.5 Improvement of Yawrate Gain

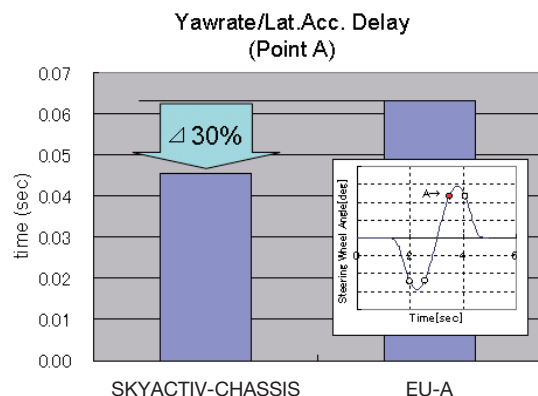
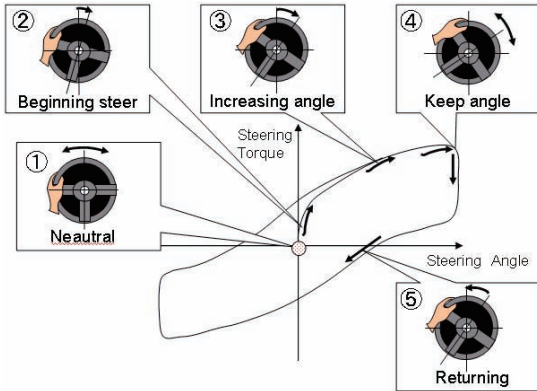


Fig.6 Improvement of Timelag (Yawrate/Lateral G)

2.3.1.2 車速に適応した操舵フィールの実現

中低速域での軽快感と高速域での安定感の両立は、各車速域での操舵フィールと関係が深い。そこで中低速域と高速域で求められる操舵フィールの整理を行い、車速域ごとに直立や切り込み始めといった操舵状態に対して求められる操舵フィールは異なることに着目した (Fig.7)。



		Urban-speed range		Highway-speed range		Vehicle speed	
		Agility		Stability			
*LA: Lateral Acceleration		0	100	100	250		
Steering wheel	Vehicle	Agility Feel	Stability Feel	Metrics			
① Neutral	straight	understand the steering center easily by steering torque slope	self-centering immediately if input the steering torque slightly	-Torque deadband -Torque build up			
② Beginning steer	beginning Yawing	less phase lag time between steering torque and vehicle yaw response	more phase lag time between steering torque and vehicle yaw response	-Torque dead band -Torque build up			
③ Increasing steer angle	turning w/ increasing LA	increasing steering torque as increasing LA	increasing steering torque as increasing LA	-Torque linearity			
④ Keeping steer angle	turning w/ constant LA	little disturbed amount when experiencing disturbance	keeping steer angle easily - little disturbed amount when experiencing disturbance	-Torque hysteresis			
⑤ Returning steer	turning w/ decreasing LA	self-centering steering wheel and vehicle immediately	self-centering steering wheel and vehicle modelately w/o overshoot	-Returnability			

Fig.7 Steering Condition & Ideal Steering Feeling

<シーン①：直立>

中低速域ではハンドルセンタの位置が明確に分かることを、高速域では多少の操舵力や外乱に動じない直進安定性を狙い、フロントサスペンションのキャストトレール (Fig.8) の拡大によるセルフライニングトルクの増大と車速別アシスト特性マップの適正化を行い、横Gに対するトルク勾配を一定化した (Fig.9)。

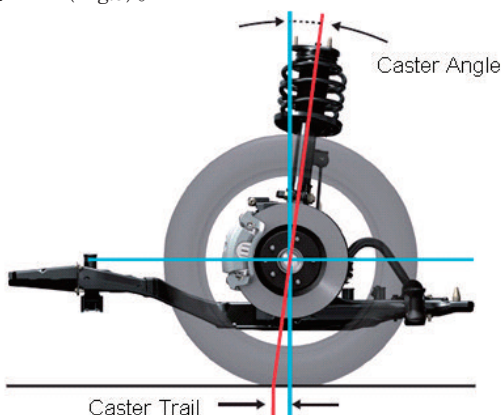


Fig.8 Front Caster Trail

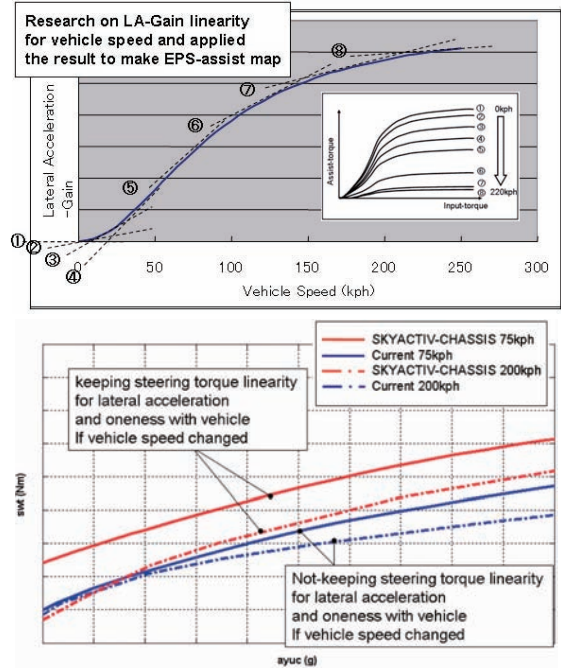


Fig.9 Characteristic of Steering Assist

<シーン②：切り込み始め>

中低速域ではドライバーの操舵に対して、手応えと車の動き出しに位相が少ない方が軽快に感じるため、操舵トルクに対するヨー運動の位相を短縮することを狙った。これに対し、0.5Nm以下の低インプットトルクに対してアシストを増やすことで実現した。高速域ではドライバーの操舵に対して、手応えを感じてから車が動く方が安心感を感じるため、操舵トルクに対してヨー運動の位相を遅らせること (レスポンスディレイ) を狙い、中低速とは異なり、0.5Nm以下の低インプットトルクに対してアシストを減らし、位相を遅らせることで実現した (Fig.10)。

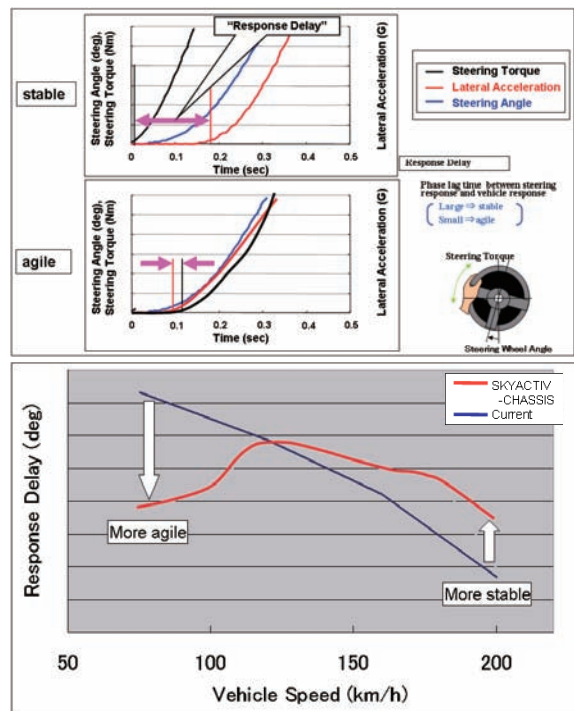


Fig.10 Response Delay

<シーン③：切り込み>

全車速で横Gに対してリニアに変化する操舵フィールを狙い、車速別アシスト特性マップを設定した。

<シーン④：保舵>

中低速では外乱を受けても操舵トルク変動なく安定して旋回ができることを、高速域では常に保舵ができることで疲労を軽減させること、かつ外乱を受けても操舵トルクが抜けないことを狙い、保舵力制御により適度な外乱抑制を実現した (Fig.11)。

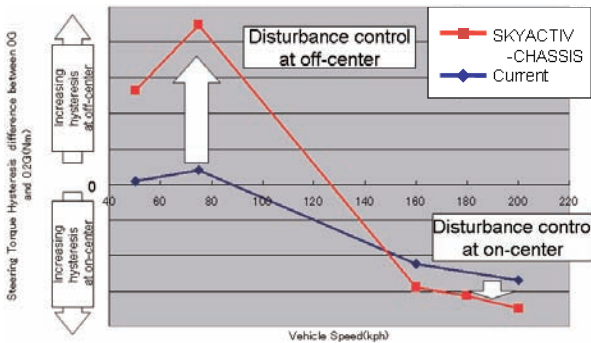


Fig.11 Effect of Disturbance Control

<シーン⑤：切り戻し>

中低速域では、ハンドルと車両がオーバシュートなく直進状態に戻ることを、高速域では戻り始めとセンタ付近での穏やかなコントロール性を狙った。これに対し、戻し速度制御により良好な車両収れん性を実現した (Fig.12, 13)。

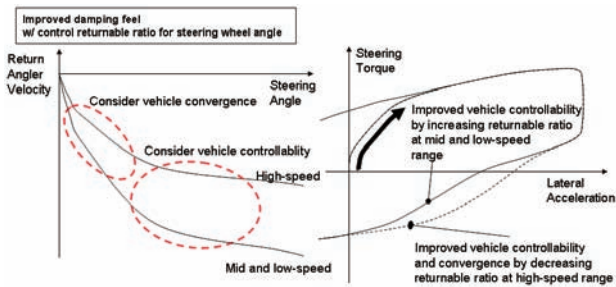


Fig.12 Concept of Steering Returnability Control

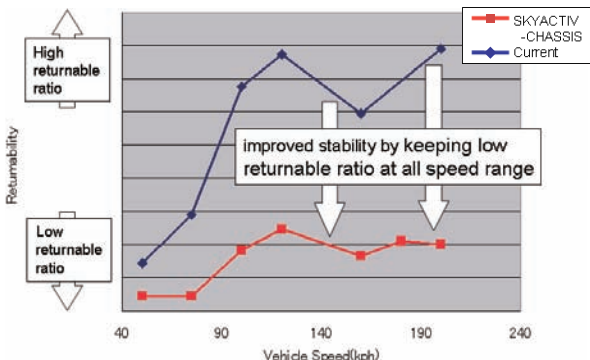


Fig.13 Effect of Steering Returnability Control

これらの考え方・制御方法により車速を問わず一体感と安心感の両立をはかる操舵フィールを実現した。

2.3.2 (B) 中低速域の軽快感と乗心地の両立

2.3.2.1 リヤ上下方向入力の低減

前述したリヤサスペンションのリンク配置最適化により、車両運動に必要なCPに占めるタイヤ接地荷重変動成分を低減することができる。これによりダンパの減衰力とトップマウントラバーの剛性が低減可能となり、上下方向の車体入力を低減。結果、Bumpy/Choppy (ヒョコヒョコした乗心地) を改善した (Fig.14)。

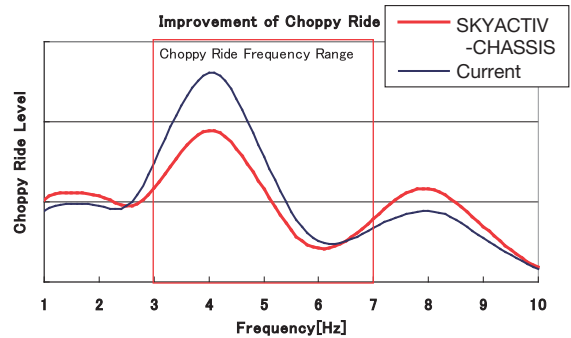


Fig.14 Result of Choppy Ride Measurement

2.3.2.2 リヤ前後方向入力の低減

トレーリング式マルチリンクサスペンションでは乗心地改善を目的にトレーリングアーム車体取付点を極力高い位置に取り付けたい。しかしながら従来の車体構造では、フレーム必要断面を確保するために、後席スペースや燃料タンク容量を悪化させることになる (Fig.15)。

そこで、リヤサイドフレームの断面内にトレーリングブッシュを収める構造を採用し、フレーム下面の大きな開口に対する剛性や後面衝突性能の確保は、断面内部に節を配置したボックス構造とすることで、前後左右の入力に対し断面崩れを抑制し、剛性・後面衝突性能とレイアウトスペースを両立させた (Fig.16)。

結果、トレーリングアーム取付位置を現行Mazda6比43mm上方へ移動でき、トレーリングアームが上下ストロークに対してFig.17に示す後退軌跡化を実現。これによりタイヤへの突起入力をアームの前後方向に伝達しにくくなり、ブッシュへの前後入力が低減し、Impact shock (突起乗越し時のショック) を改善した (Fig.18)。

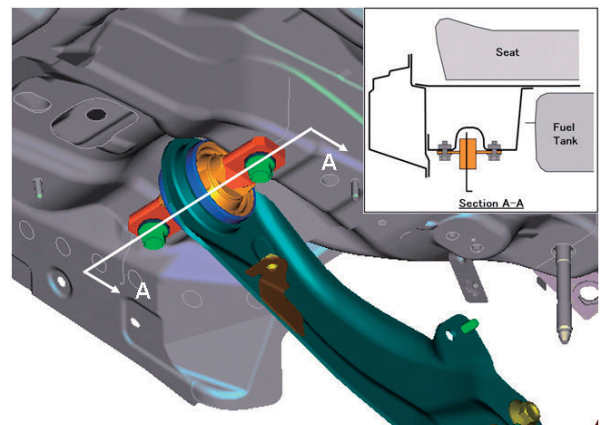


Fig.15 Current Model Structure

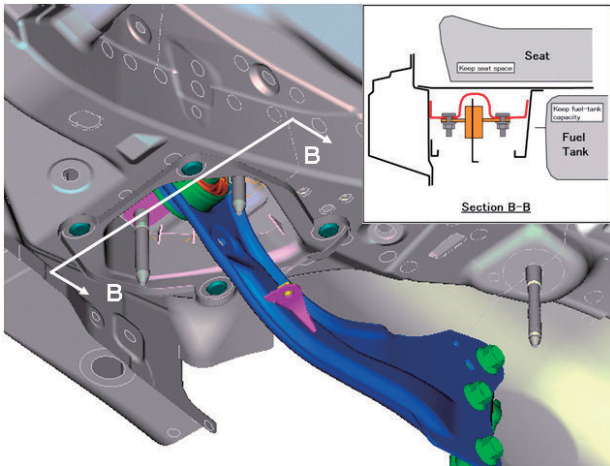


Fig.16 SKYACTIV-CHASSIS Structure

2.3.2.3 制動時の安心感の改善

トレーリングアーム取付位置の変更により、制動力に対する車体を引き下げる力（アンチリフト力、Fig.19）が増大する。これにより制動時の姿勢変化を低減（Fig.20）し安心感を高めると同時に、接地荷重変動を抑制することで効果的な制動力を発揮することが可能となり、制動距離も短縮した。

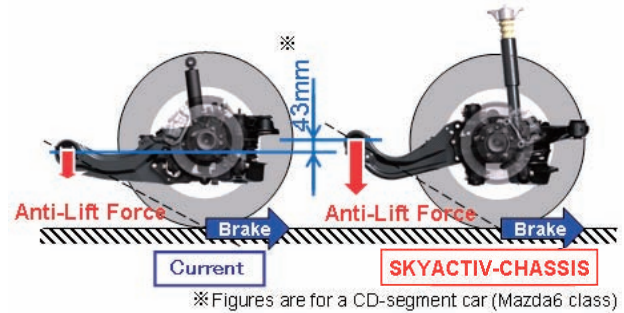


Fig.19 Anti-lift Force

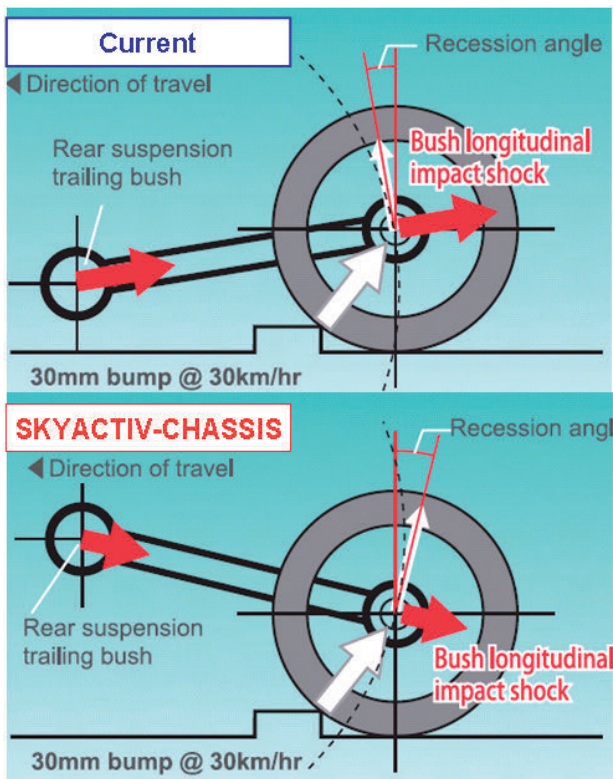


Fig.17 Increase Recession Angle

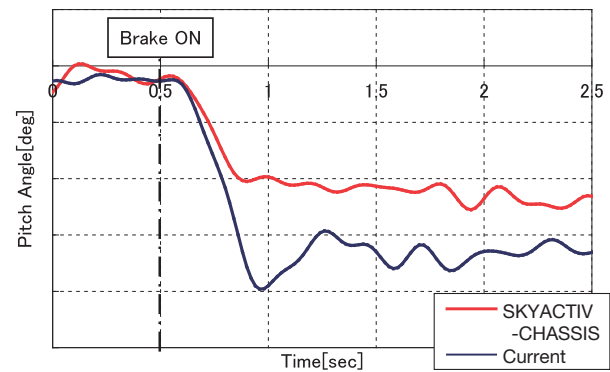


Fig.20 Control a Pitch Angle

2.3.3 (C) 軽量化とダイナミクス性能の両立

ここではサスクロス（サスペンションメンバ）を例にして、構造最適化（基本骨格の最適化、接合要素技術）による軽量化と剛性の両立技術について紹介する。

基本骨格の最適化については、要求される機能を実現した上で、質量を低減するため、最適な構造を求めてCAEでコンセプトモデルを作成。車体パッケージとの整合性を確認しながら最終形状を決定した。フロントではセンタメンバの断面を拡大しロアアーム取付位置の前後オフセット量を縮小。リヤではクロスバーの前後スパンを拡大しラテラルリンク取付位置の前後オフセット量を縮小した（Fig.21）。

次に接合要素技術については、フロント/リヤとも溶接フランジを削減（フランジレス化）し、溶接部の結合剛性を高め（Fig.22）、結果として部材の板厚を下げ軽量化を実現することができた（Fig.23）。

これらの構造を採用することにより軽量化と高剛性の両立を図り、シャシー全体で旧型比14%（現行Mazda6クラス比）の軽量化を実現した。

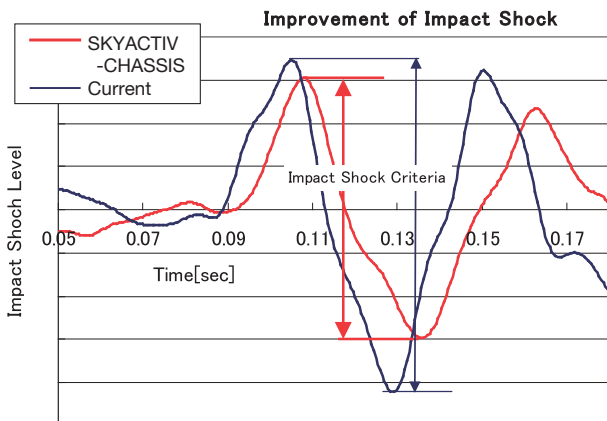


Fig.18 Result of Impact Shock Measurement

3. ブレーキ

3.1 技術の狙い

ブレーキ性能は一体感（コントロール性）、安心感（ブレーキの効き）、快適性（制動時の静粛性）がいかなる状況下においても高次元でバランスされていることを目指し、背反する性能の両立を目指した。具体的には、

(A) 軽量化と冷却性の両立

(B) 効きと静粛性（制動時ブレーキ異音低減）の両立をブレークスルーすべき技術課題として設定した（Fig.24）。

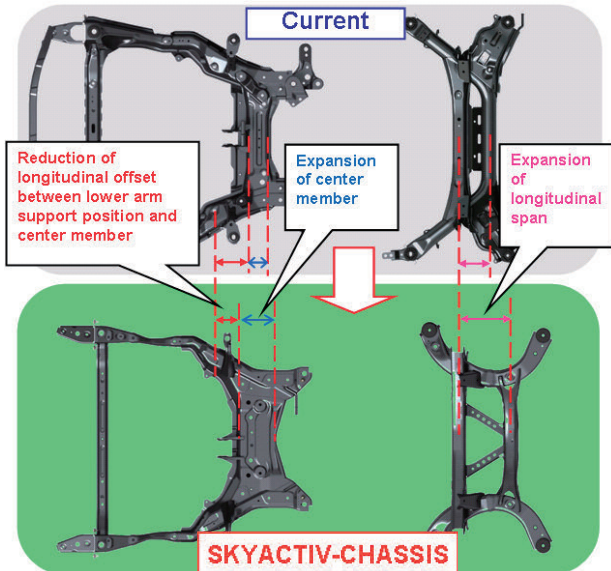


Fig.21 Optimization of Base Structure

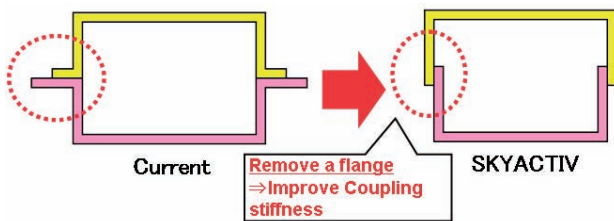


Fig.22 Coupling Elemental Technology

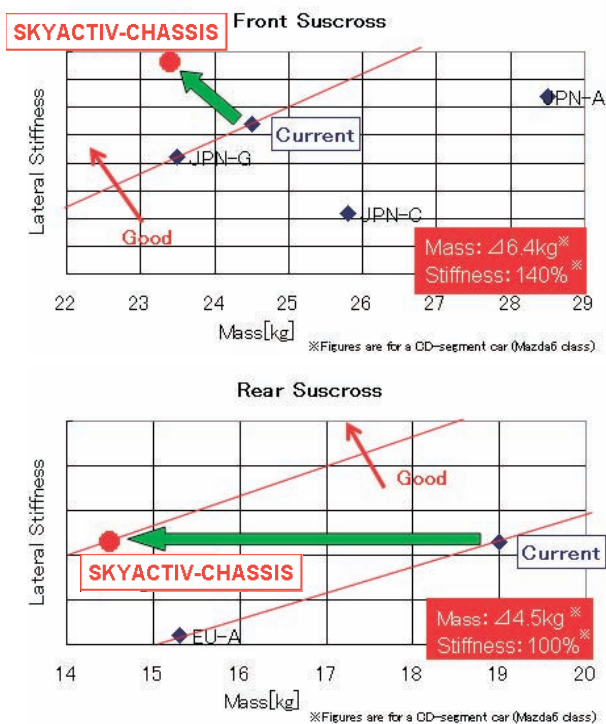


Fig.23 Mass of Suscross Member

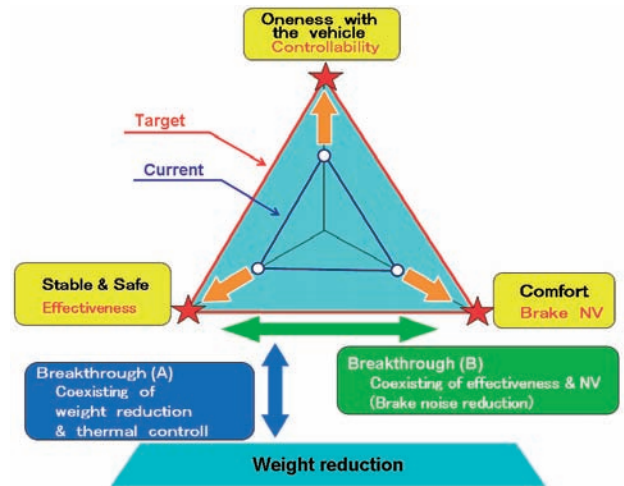


Fig.24 Development Target

3.2 開発のアプローチ

背反する性能両立のために、ブレーキの温度、効き、ノイズのバラつき解明に基づく要因分析を通じて寄与率の高い因子を抽出した。更にその因子を基にCAE解析、固有振動解析、実機検証によるパラメータスタディによりブレーキ部品の最適構造を検討した。

3.3 ブレークスルー技術

3.3.1 (A) 軽量化と冷却性の両立

ブレーキの基本的な機能は車両の運動エネルギーを熱エネルギーに変換することである。しかし制動時に発生する熱による各部品の温度上昇は摩擦係数の変動や摩擦材の磨耗促進などによりブレーキの商品性に悪影響を及ぼす。温度上昇を抑制するにはブレーキ部品の冷却性を向上させる方法と熱容量を増やす方法があるが、熱容量増加は質量の増加を伴う。そこで質量増加を抑制しつつブレーキ温度上昇抑制のためにブレーキの冷却性を向上させることに注力した。

3.3.1.1 ブレーキ冷却風の効率的取り込みの実現

Cd低減を目的にタイヤデフレクタが大型化されブレーキロータ、キャリパへ向かう冷却風が減少する傾向にあり、Cd低減とブレーキ冷却風の確保という背反に対して短期間に両立可能な構造を決定する必要がある。机上解析ツールとしてCFD (Computational Fluid Dynamics) 活用にてタイヤデフレクタ、ダストカバーなどのレイアウト、形状の最適化

を行い、ブレーキ冷却性を損なうことなくCd低減を実現した (Fig.25)。具体的にはバンパ周辺およびホイールハウス内の風の流れを表す流線および圧力・流速分布を比較しながら各部品のレイアウト、形状を変更する。ブレーキ冷却性の代用特性としてブレーキロータの熱伝達率を用い、Cd値と併せてブレーキ冷却性への影響を確認しレイアウト、形状を決定した (Fig.26)。

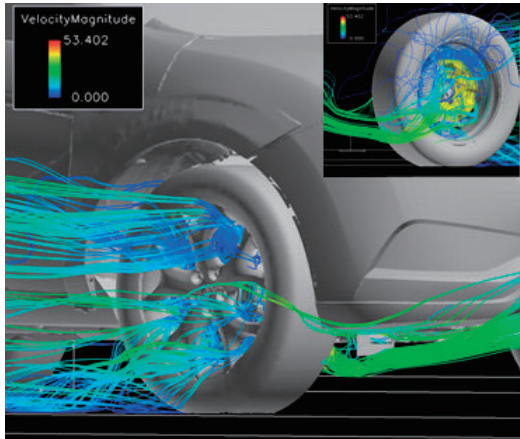


Fig.25 Stream Line from Forward of Vehicle to Brake

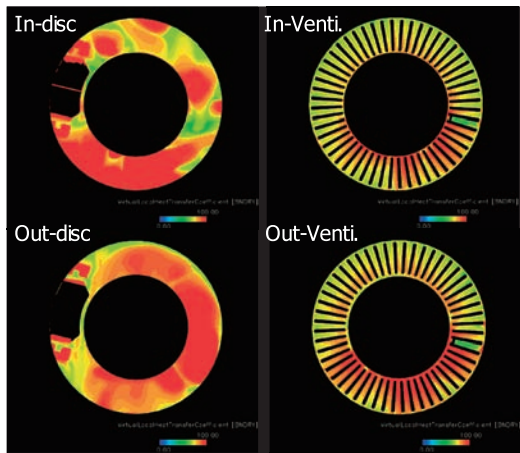


Fig.26 Distribution of Heat Transfer Coefficient on Surface of Rotor

3.3.1.2 ブレーキロータの冷却性向上の実現

ブレーキロータはブレーキノイズ等の振動&異音現象に深く係わる部品であり、その形状決定には冷却性、軽量化とのバランスが必須となる。

そこで、ブレーキロータに要求される性能 (冷却性、軽量化、音&振動性) を各々特性に置き換え、

- ・冷却性→ブレーキロータ摺動部の放熱性
- ・軽量化→ブレーキロータ質量
- ・音&振動性→他部品との固有値離間、熱倒れ量

各特性に寄与すると考えられるロータ部位の寸法を制御因子とし、寄与度を分析して温度上昇抑制、重量抑制、熱変形

抑制、固有振動数離間を両立するベストバランスとなる形状&寸法を決定した (Fig.27)。

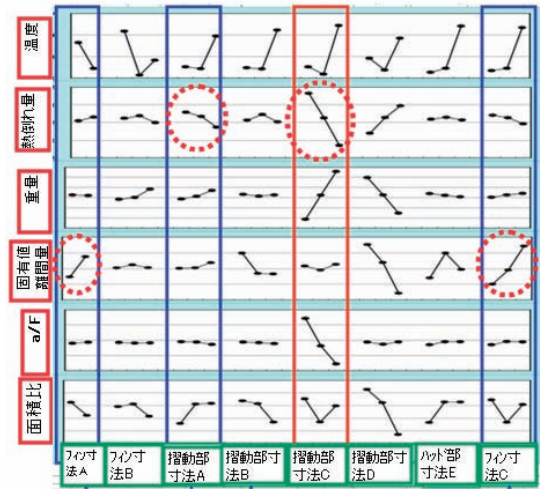


Fig.27 Fractional Diagram for Brake Performance

3.3.2 (B) 効きと静粛性の両立

制動過程において回生制動を除き、車両運動エネルギーのほとんどは熱エネルギーへ変換され放出されるが、ごく一部は振動エネルギーとなり、これがブレーキのスキルノイズ等の異音発生要因の一部と考えられている。一般的に摩擦係数を上げる (ブレーキの効きを向上させる) と振動エネルギーも増えるため、ブレーキの効き向上とブレーキ音振の抑制は背反と考えられるが、今回振動エネルギーを抑制するブレーキキャリパ構造を構築することによりこの両立を図った (Fig.28)。

具体的には、まずブレーキに直結した電動モータを回転させながらブレーキを作動させる。制動時のモータ電力波形に現れる乱れをノイズ発生に繋がる振動エネルギーとして捉え、その変化の大小 (起振力の大小) に寄与するパラメータを制御因子として規定した。これら因子を基に品質工学を活用し振動エネルギーが最小かつ安定する構造を見出した。

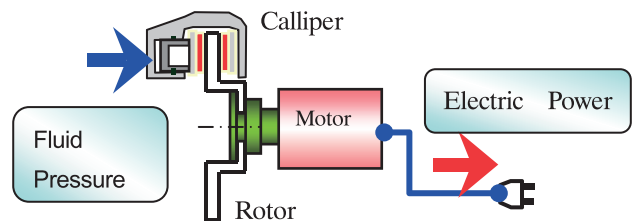


Fig.28 Brake Energy Measurement System

一方、共振性についても境界条件 (ブレーキ構成部品間の接触条件) を全面的に見直し、実機とのコリレーションに基づく複素固有値解析の精度を向上させ、耐ノイズ性能の優れたブレーキ構造を確立した (Fig.29)。

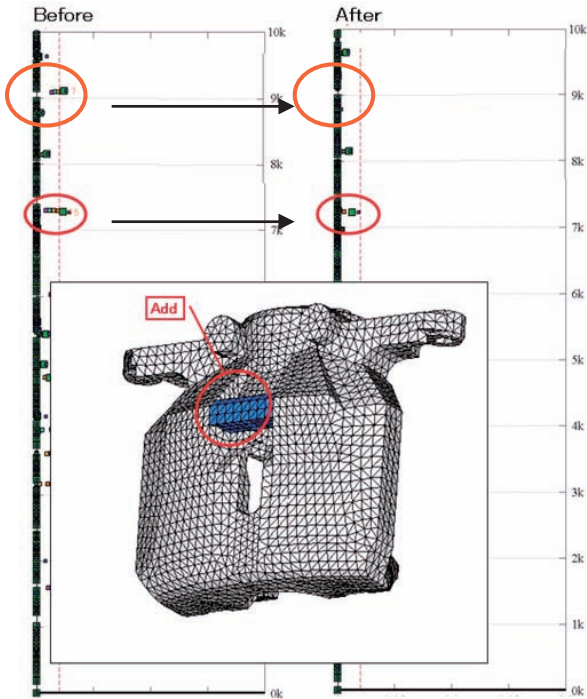


Fig.29 Shape Optimization by Complex Eigenfrequency Analysis

4. おわりに

SKYACTIV-シャーシは、背反要素をブレークスルーする技術開発に取組み、サスペンション・ステアリング・ブレーキをはじめシャーシ全てを一新することで、「人馬一体のドライビングプレジャー」と「走りの質」を向上させながら、現行Mazda6クラス比14%の軽量化を実現した。これらの技術は今後のマツダ全車に投入し、お客様に提供する。

ご協力いただいた関係者の方々に感謝するとともに、マツダでは更なるブレークスルーを目指し今後も技術開発に取組んでいく。

■ 著 者 ■



山本忠信



井芹晴明



東 裕章



江島勝美



望月浩孝



渡邊雅哉



安野谷知城



開原真一