

特集：新型MAZDA3

14

## 新型MAZDA3のビークルダイナミクス技術 Vehicle Dynamics Technology for All-New Mazda3

塚根 芳将\*1      富家 進\*2      元吉 菜緒子\*3  
Yoshimasa Tsukane      Susumu Tomiie      Naoko Motoyoshi  
吉村 匡史\*4  
Tadashi Yoshimura

### 要 約

新型MAZDA3では人馬一体の走る喜びを更に進化させるために人の行動原理を分析、人が普段から歩行する際に使っているバランス保持能力に着目した。そして運転中でもバランス保持能力を発揮できることが、車と人を一体に感じさせる車のあり方であると考え、シート、車体、サスペンション、タイヤの機能を根本から見直し、新たな車両構造技術（SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTURE）を開発した。その結果、新型MAZDA3では、まるで自分の手足のように違和感なく運転でき、長時間運転しても疲れを感じない運動性能を実現させ、人馬一体の向上と走りの質を高めることができた。

### Summary

In the process of developing the All-New Mazda3, we analyzed human behavioral principle to further enhance Jinba-Ittai driving pleasure (the sense that a driver and a vehicle become one just as the horse becomes a natural extension of the rider) and focused on human ability to maintain balance while walking in a normal way. We considered being able to maintain body balance while driving to be the way a vehicle was supposed to be if we were to provide a sense of oneness between the driver and the vehicle. With an eye toward replicating the body balance in walking, we fundamentally reviewed functions of tire, suspension, car body and seat, and eventually developed a new technology for vehicle structure called Skyactiv-Vehicle Architecture. As a result, the All-New Mazda3 has achieved a driving dynamics which allows a driver to handle the vehicle without having a feeling of discomfort and also drive long hours without a feeling of fatigue, thereby leading to enhanced Jinba-Ittai driving performance and quality.

**Key words** : vehicle dynamics, vehicle development, suspension system, seat

### 1. はじめに

マツダは理想の乗り心地性能と操縦安定性能を目指し、人間中心の哲学に基づき車を開発している。それは理想性能の実現には人がもつ優れた能力を乗車した状態でも最大限に発揮できることが必要不可欠と考えるからである。運転中でも歩行時と同じように体のバランスをとることができれば、頭部が安定した快適な乗心地が実現できる。またドライバーのハンドル操作に対して人の行動原理に沿う形で車が応答すれば、手足のような感覚で車をコントロールすることができ、人馬一体の操縦安定性能が実現できると考える。

それを実現させるため、新世代のシャシープラットフォーム

フォームでは人間中心の考えに基づき、骨盤を正しい位置・角度に着座させることを最も重要な制御因子として、シートから車体、シャシー、タイヤまでのそれぞれのエネルギー伝達を時間軸でコントロールし、各ユニットが有機的な連携をもつよう、全ての部品を根本から見直した。そして新たな車両構造技術=SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTUREを開発し、新型MAZDA3に採用することで、車との一体感、意のままのハンドリング、快適性と安心感を向上させた。

本稿では、はじめに人の歩行動作を例に、人のバランス保持能力と普遍的な動作について説明する。そして車を運転している時でもバランス保持能力を発揮できる車両運動の考え方と、新型MAZDA3での達成手段、及び

\*1 操安性能開発部  
Chassis Dynamics Development Dept.

\*2~3 装備開発部  
Interior & Exterior Components Development Dept.

\*4 シャシー開発部  
Chassis Development Dept.

達成結果について紹介する。

## 2. 人の普遍的な動作

人は規則性のある滑らかな動きを心地よく感じ、不規則で不連続な動きを不快と感じる。普段何気なく行っている歩行動作を例にとると、三半規管がある頭部の上下の動きは僅か5cmほどに抑えられ、滑らかで連続したサインカーブで動いている (Fig. 1)。

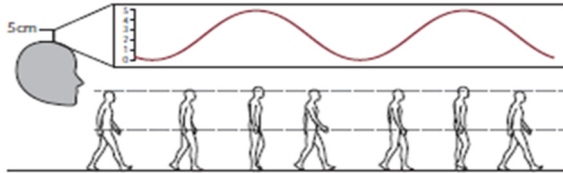


Fig. 1 Vertical Displacement of Head while Walking

人の体は骨盤と上半身から構成されるパッセンジャーユニットと、骨盤と下半身から構成されるロコモーターユニットに分けることができる<sup>(1)</sup> (Fig. 2)。歩行中はこの2つのユニットが骨盤を介して連携しながら機能することで、どんな路面であっても目線を安定させて歩行することができる。この究極のサスペンションともいえるパッセンジャー/ロコモーターユニットの機能とメカニズムを新世代のシャシープラットフォーム開発に取り入れた。

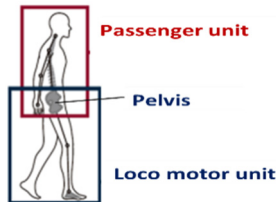


Fig. 2 Passenger & Locomotor Unit

## 3. 頭部を安定させる

### 3.1 パッセンジャーユニットの機能

パッセンジャーユニットは骨盤に入る入力に対して自らの姿勢を安定させる機能をもつ<sup>(1)</sup>。この機能を発揮させるために最も重要となるのが骨盤の姿勢である。骨盤が立った状態 (ニュートラルポジション) であれば脊柱は自然とFig. 3のようなS字カーブを描いた形状となり、骨盤から伝わる振動に対して脊柱を柔軟に撓ませて頭部を安定させることができる。

また歩行動作を後方から観察すると左右の足の動きに合わせて骨盤を左右に傾けながら歩行している。この際、Fig. 3のように脊柱を撓ませ、上体を骨盤の動きと逆相に傾けることで体のバランスをとり、頭部の動きを安定

させている。

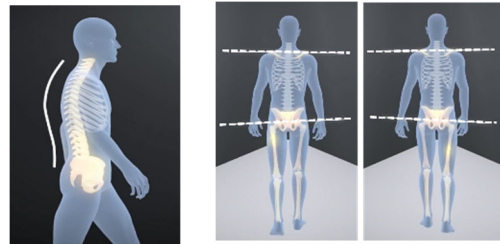


Fig. 3 Spine Curves (Side & Backside)

### 3.2 バランス保持能力を発揮できるシート

理想の乗り心地を実現させるため、ドライバーが車のシートに座った状態でもパッセンジャーユニットの「頭を安定させる」機能を発揮できるようにする。そのためにシートに着座した状態でも骨盤を立てて、脊柱を自然なS字カーブに保持できるシートを目指した。

### 3.3 シート構造

骨盤を立てさせて脊柱のS字カーブを保持させるためには、次のようなシート特性が必要であると考えた (Fig. 4)。

- (1) 骨盤全体を包み込むように支えることで、骨盤を自立させる。
- (2) 臀部が前ずれして骨盤が後転しないよう大腿部の支持力を高める。
- (3) 腰椎部を支え、骨盤が後転しないよう骨盤上部の支持力を高める。
- (4) 脊柱のS字カーブを維持できるように、S字カーブ上部にあたる胸郭重心位置を包み込むように支える。

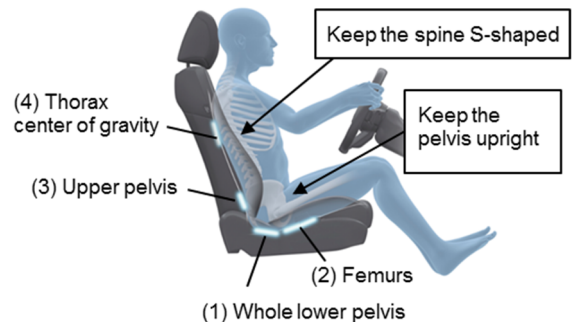


Fig. 4 Ideal Seating Posture

これらのシート特性を実現させるため、シート形状やたわみ特性、構造を最適化した。

(1)については、骨盤が自立するように、骨盤直下のクッション形状をフラットな面とし、面全体がたわむ特性とすることで、骨盤の安定度を増した。

(2)については、大腿部の支持力を高めるために、クッション形状の変曲点位置を従来から変更し、変曲点前後の座面角度の変化量も最適化することで、臀部の前ずれ

を防止した。更に大腿部を支持するクッション座面角度を変更できるように、前チルト調整機構を採用した。これにより、小柄から大柄な体格までの乗員を適切に支持することができた。

(3)、(4)についてはシートバックの支持構造を変更した。シートバックの各部位での支持力を変化できるように、独立したコイルバネを採用した。またそれらを人体の骨格を考慮して配置することで、骨盤上部・胸郭部それぞれに必要な支持力・支持範囲 (Kt, Kl, Kp) を実現した。

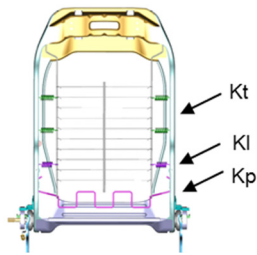


Fig. 5 Backrest Structure

3.4 シート着座姿勢

(1) 骨盤を立てた着座姿勢

骨盤の①上前腸骨棘と②大転子を結んだ線と、水平線の成す角度を骨盤角度と定義し (Fig. 6), 触診により上記2点にマーキングを付け、側面からカメラ撮影し骨盤角度を算出した。標準体格のパネラーにおける立位状態からシート着座状態の骨盤角度の変化量をFig.6に示す。変化量が小さいほど骨盤が立っていることを示しており、新型MAZDA3は骨盤を立てて着座できていることが確認できた。

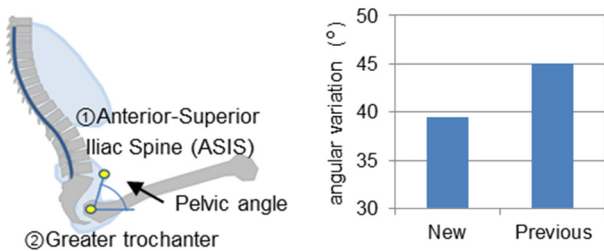


Fig. 6 Measurement Method of Pelvic Angle & Pelvic Angle Variation

(2) 脊柱のS字カーブ保持性

標準体格のパネラーで計測したシートバックの体圧分布をFig. 7に示す。縦軸にシートバックの高さ位置を、横軸に座面部の各高さ位置における荷重和の割合を示す。新型MAZDA3は、シートバックは骨盤上部の支持圧が高く、骨盤が倒れないように支持している。また、骨盤上部から胸郭部までを脊柱に沿うように連続的に支持しており、脊柱のS字カーブを保持しやすい特性であることが確認できた。

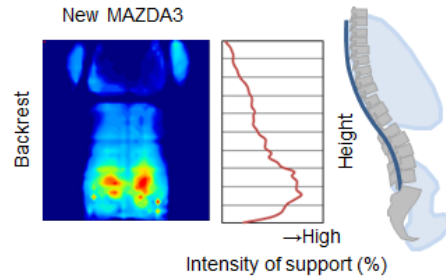


Fig. 7 Pressure Distribution of Backrest

4. 入力を滑らかにする

4.1 ロコモーターユニットの機能

ロコモーターユニットは前に進む機能と路面からの入力を滑らかに整える機能をもつ。人が歩行する際の下肢の動きを側面から観察すると、Fig. 8のように踵位置の軌跡は前後・上下に複雑で不連続な動きをしているが、下肢の関節や筋肉が連携して機能することで、骨盤の動きは小さく抑えられ、周期的で滑らかな動きとなっている。

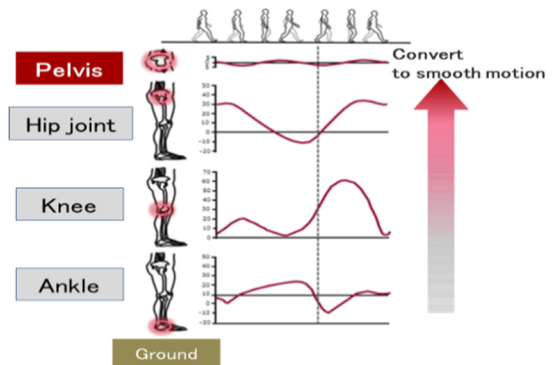


Fig. 8 Vertical Position of Foot Joints

4.2 ロコモーターユニットとしての車の機能

車のシートに座った状態ではロコモーターユニットの機能を発揮することができない。そのためFig. 9のように車のタイヤ、シャシー、車体、シートがその役割を担うことになる。具体的にはタイヤとサスペンションによって路面から入る不連続な入力をXYZ軸の位相が揃った滑らかな入力に変換し、そして遅れなく車体に伝える。車体とシートはサスペンションから入る入力をドライバーの骨盤に遅れなく伝達させることを目指した。

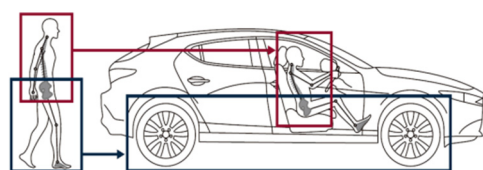


Fig. 9 Transfer Function of Body to Car

4.3 路面入力を滑らかにするシャシー

路面からの入力を、位相を揃えて滑らかにして、車体に遅れなく伝えるために、タイヤ、サスペンション部品のエネルギー伝達を時間軸で連携させるというコンセプトの下開発を行った。Fig. 10はスロープ路面を乗り越えた際のエネルギー伝達のコンセプトを図示したものである。以下にその時間軸でのつながりを説明する。

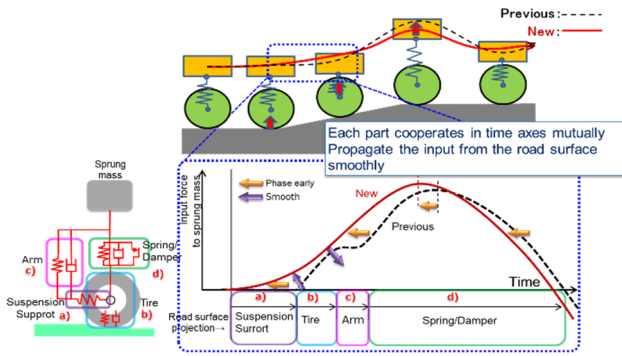


Fig. 10 Concept of Suspension Part Cooperates

(a) タイヤの位置決め

サスペンションの支持剛性を高めて、路面からの入力を素早くタイヤで受け止める。

(b) タイヤのエネルギー減衰

タイヤを早期にたわませて、路面からのエネルギーを減衰させ、残りをアーム・ばね・ダンパーへ伝える。

(c) 入力の位相を揃える

ロアアームの動きでタイヤから伝わる入力の向きを揃えて、素早く、ばね・ダンパーに伝える。

(d) ばね・ダンパーで入力を滑らかにする

ばね・ダンパーを滑らかにストロークさせることで、入力を減衰させながら滑らかにし、残りを車体に伝える。

以下に、(a)から(d)それぞれについて具体的施策を述べる。

4.4 タイヤの位置決め (a)

車体に入る入力を滑らかにするには、路面からの入力を早期にタイヤで受け止める必要があり、サスペンションの位置決め機能が重要となる。前モデルのフロントロアアームの前側ブッシュは、車両前後方向のばね定数が低く、ストッパー部とのクリアランスがあるため、支持剛性が低い構造であった。新型MAZDA3では、前側ブッシュを、ストッパークリアランスを持たない構造に変更し、ブッシュの前後方向の剛性を高めた。これによりタイヤに前後方向の入力が入った際のホイールセンターの前後変位を、前モデルに対して約25%小さくすることができた。

4.5 タイヤのエネルギー減衰 (b)

新型MAZDA3ではタイヤを含めた車両全体で機能を再配分し、相互支援しながら全ての性能を同時に高めていく考えに基づきタイヤ開発を行った。具体的にはタイヤの上下方向のばね定数を前モデルのタイヤに対して約10%柔らかくすることで、路面からの入力をタイヤのたわみによって滑らかにするとともに、惰行時はエネルギーロス少なく転がり、荷重がかかった時は接地面が広がり、タイヤ横力を遅れなく発生する特性とした。

4.6 入力の位相を揃える (c)

サスペンションに入るさまざまな方向からの入力に対して、ロアアームの作動軸を定め、ホイールセンターを動かしたい方向に動かすことで、入力の位相を揃えることを目指した。そのためにタイヤからの入力の方向を単純化して考えた。Fig. 11にその考え方を示す。前後方向の入力に対しては、ロアアーム後ろ側ブッシュを左右に動かし、前側ブッシュをピボットとしてロアアームが回転する挙動とした。上下方向の入力に対しては、前後ブッシュを軸とし揺動させる。そうすることで複合入力に対しては、入力の大きさによらずホイールセンターの動く向きが揃い、連続的な動きを作ることができる。ねらいの動きを実現させるために、ブッシュの並進方向、回転方向の特性を見直し、新構造のブッシュを開発した。前側ブッシュは前後方向のばね定数を高め、こじり方向のばね定数を低減させた。後ろ側ブッシュは前後方向のばね定数を高め、左右方向に動きやすいばね定数とした。Fig. 12にその一例として、新型MAZDA3と前モデルのロアアーム前側ブッシュの特性比較を示す。

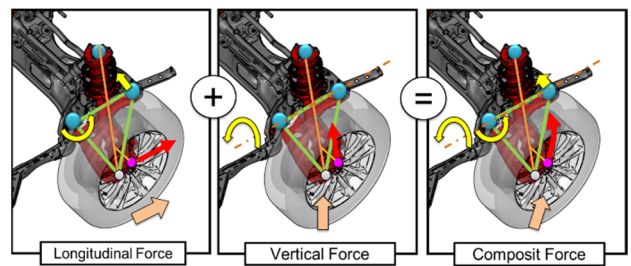


Fig. 11 Input Force to Front Suspension

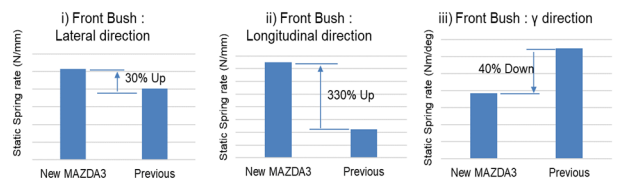


Fig. 12 Comparison LCA Bushing spring rate of Previous and New MAZDA3

上述のブッシュに加えてサスペンションジオメトリー

にも新たな考えを織り込んだ。ロアアーム角を常に下向きとすることで、タイヤからの入力を、アームを介して早期に車体側に伝えるようにした (Fig. 13にロアアーム角度部位を示す)。

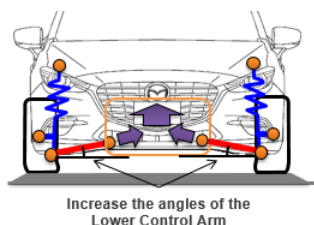


Fig. 13 Lower Control Arm Angle

タイヤから入る入力の位相を揃えて、素早くばね・ダンパーに伝える施策について、実車で確認結果を述べる。Fig. 14 は高さ30mmの段差に設置されたスロープを時速10km/hで乗り上げた際の車両側面から見たホイールセンターの軌跡を示す。新型MAZDA3は、入力的大小によらずホイールセンターが常に上向きに動き、初期からばねとダンパーに入力を伝達させていることが確認できた。

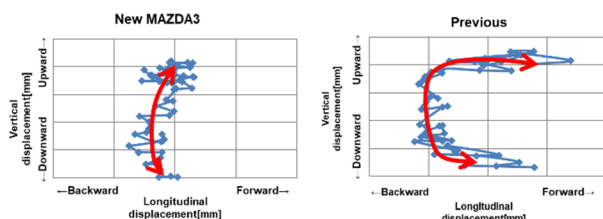


Fig. 14 Wheel Center Displacement

#### 4.6 ばね・ダンパーで入力を滑らかにする (d)

車体に入る入力を滑らかにするために、サスペンションをスムーズにストロークさせ、入力が入る早期からダンパーによる減衰を活用する。そのため新型MAZDA3ではフロントストラット式サスペンションのばねの配置と位相を左右それぞれで最適な方向に定め、ばね反力によってダンパーに加わる横力を低減させた。その結果、サスペンションがストロークする際のダンパートップに入る横力を前モデルに対して半分以上に低減することができた。

またサスペンションのスムーズなストロークを目指し、フロントストラットマウントはダンパーロッド軸のこじり方向のばね定数を下げるとともに、タイヤの位置決め機能が高めるためにダンパー軸直方向のばね定数が高い新構造のマウントを開発した。Fig. 15に新型MAZDA3と前モデルのストラットマウントラバーの特性差を示す。左右方向、前後方向のばね定数を上げ、位置決め機能を高めながら、こじり (γ) 方向の特性を大きく低減した。

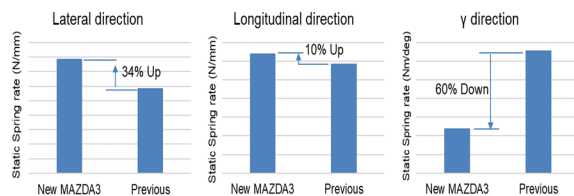


Fig. 15 Comparison Strut Mounting Rubber Spring Rate of Previous and New MAZDA3

Fig. 16は先述のスロープ路面を乗り上げた際のシート取り付け部における車体の前後方向 (Ax), 上下方向 (Az) の加速度を示す。新型MAZDA3は、前後方向と上下方向の加速度の位相が一致し、加速度変化が滑らかになっていることが確認できた。

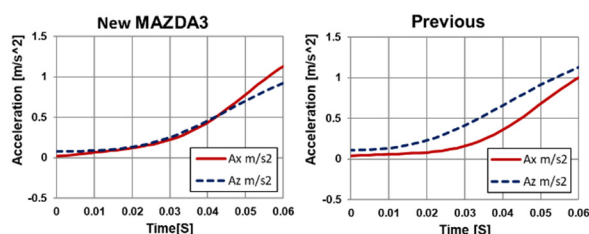


Fig. 16 Floor Acceleration

## 5. 達成状況

### 5.1 コーナリング中の骨盤と上体の挙動

新型MAZDA3では、運転中も歩行時と同じく、骨盤と上体を逆相に動かすことで身体のバランスを取り、頭部の動きを安定させることを目指した。

操縦安定性を評価する社内のテストコースで、緩やかなコーナーを走行中の人体挙動について慣性式モーションキャプチャーを用いて測定し、各関節角度を算出した。Fig. 17は、第二/第三胸椎関節 (T2-T3), 第二/第三腰椎関節 (L2-L3) のロール角とヨー角の時系列変化を示す。新型MAZDA3は、胸椎部と腰椎部の関節角度がロール、ヨーともに逆方向の動きを示した。

このように、運転中も歩行時と同じく、骨盤と上体が逆相に動いていることが確認できた。

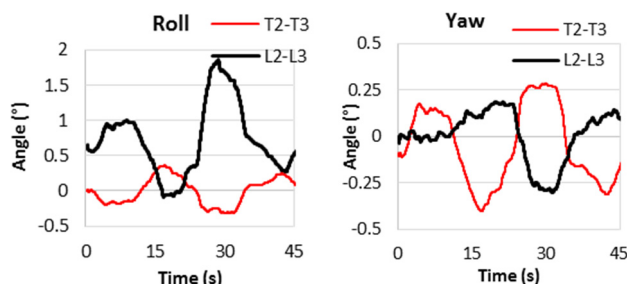


Fig. 17 Roll & Yaw Angle of Articular

### 5.2 コーナリング中の頭部の挙動

緩やかなコーナーに進入した際の頭部の動きを、慣性式モーションキャプチャーを用いて計測した。Fig. 18は横軸に横加速度、縦軸に頭部の左右方向の変位量を示す。新型MAZDA3では操舵初期から頭部が滑らかに動いており、乗員がバランス保持能力を発揮できるシート、及び車両運動になっていることが確認できた。

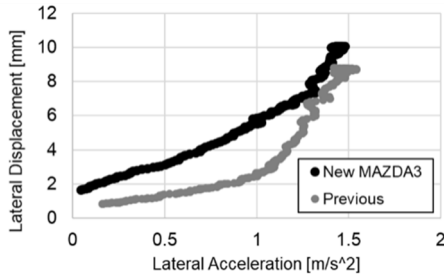


Fig. 18 Lateral Displacement of Head

### 5.3 スロープ乗り越し時の頭部の挙動

先述のスロープを時速10km/hで通過した際の頭部の動きを撮影し、画像処理からFig. 19に示す頭部①②③のポイントについて変位量を算出した。①は上部頸椎、②はこめかみ、③は目の位置にあたる。

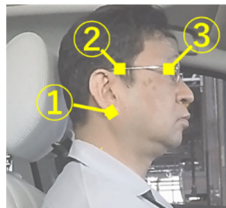


Fig. 19 Measurement Point

Fig. 20に頭部の前後移動量として①のポイントの前後変位を示す。またドライバーの視線方向として②と③のポイントを結んだ線と水平線の成す角度を示す。新型MAZDA3はドライバーが上半身のバランスをとることで、頭部の前後移動量が前モデルよりも減少し、安定していることが確認できた。また頭部のピッチの大きさとピッチの速さが抑えられており、目線を安定させやすくなっていることが確認できた。

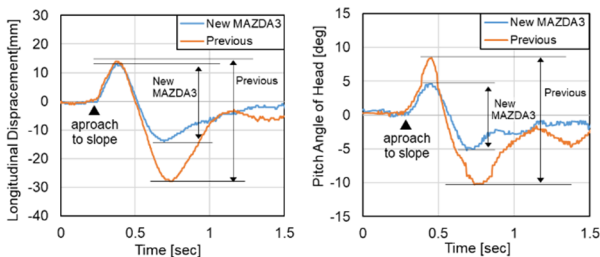


Fig. 20 Longitudinal Displacement and Pitch Angle of Head

## 6. おわりに

人の能力を発揮させることができる車両運動の考え方とそれを実現させるための新しい車両構造SKYACTIV-VEHICLE ARCHITECTUREについて紹介した。従来の自動車の機械特性を高めることに加え、人の特性に合わせた運動性能を実現させることで、これまでにないドライビングフィールと走る歓びを市場に送り出せることを嬉しく思う。今後も人の特性を研究し、人間中心の哲学に基づいた理想の車両運動の実現に向け取り組みを続けていく。

### 参考文献

- (1) Kirsten Götz - Neumann(著), 月城ほか(訳), 観察による歩行分析, 東京都, 医学書院, (2005年)

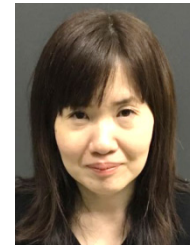
#### ■ 著 者 ■



塚根 芳将



富家 進



元吉 菜緒子



吉村 匡史