

論文・解説

18

G-Vectoring Controlの開発 Development of G-Vectoring Control

梅津 大輔 *1

Daisuke Umetsu

砂原 修 *2

Osamu Sunahara

高原 康典 *3

Yasunori Takahara

小川 大策 *4

Daisaku Ogawa

大久 千華子 *5

Chikako Ohisa

菅 俊也 *6

Toshiya Kan

氏原 健幸 *7

Kenko Ujihara

椎葉 裕明 *8

Hiroaki Shiiba

加藤 史律 *9

Fuminori Kato

要約

高応答なSKYACTIVエンジンをを用いた世界初の車両運動制御であるG-Vectoring Control (GVC) を量産化した。本システムは車両の横加加速度に応じてわずかな前後減速度を付与することで車両運動性能を高めることができる。本稿ではGVCの基本コンセプトと量産システム構成を説明し、その制御効果を示す。

Summary

The G-Vectoring Control (GVC) using high response engine torque control has been developed for mass production. G-Vectoring system generates slight deceleration in response to lateral jerk to improve vehicle dynamics. In this paper, the basic concept of G-Vectoring is summarized first, the configuration of the new system will be described followed by subjective and objective investigations into its control effects.

1. はじめに

減速・旋回・加速という車両の各運動間の連係性、すなわち「G(加速度)のつながり」の進化が、運転の楽しさや安心感といったダイナミクス性能の質感レベルまでを論じるうえで非常に重要である。著者らはこれまで、「ダイナミクス性能の統一感」と呼ぶブレーキ・ステアリング・アクセルの複合的な性能開発に取り組み、これら運転操作系のフィードバック特性と車両Gの過渡応答特性をリニアに一貫させることで、人にとって制御しやすい車両運動特性を開発してきた(Fig. 1)。これを取り入れた車両は縦軸を前後加速度、横軸を横加速度として描いたリサージュ図であるG-Gダイアグラムにおいて、加速度遷移様態をドライバーが積極的に制御しやすい特性を有している⁽¹⁾⁽²⁾。

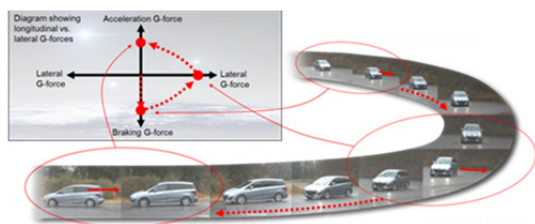


Fig. 1 Concept of "Harmonized Dynamic Feel"

しかしながら、上記のような車両においても、実際には路面のアンジュレーション等、外乱の影響による加速度変動が常に発生している。この変動に対する補正はドライバーの修正操作に委ねられるため、達成される「Gのつながり」は各ドライバーの運転操作の精緻さに依存し、そもそも人が制御できない微小な変動領域では補正そのものがなされない。今後、車両をドライバーがより快適に制御しやすいものへと進化させるためには、微小領域から限界領域に至るまで一貫して、車両自身がGのつながりを担保できるような車両運動制御が必要である。

G-Vectoring Control (以下GVC) は、ドライバーのステアリング操作によって発生する車両の横運動に対して、車両自身が前後加速度を最適に連係させる制御である⁽³⁾⁽⁴⁾。今回、マツダは一般的な走行領域において「滑らかなGのつながり」を実現し、全てのドライバーへあらゆるシーンにおける運転の楽しさと安心感を提供するため、細やかな減速度制御が可能な高応答・高精度な駆動トルク制御システムを有するSKYACTIVエンジン⁽⁵⁾⁽⁶⁾をアクチュエータとしてGVCを量産化した⁽⁷⁾。この車両では、直進時の修正操作といった微小な操舵領域から車両運動を過渡的に常時制御することができる。

本稿では、GVCの概要とシステム構成を説明し、制御による車両運動の改善効果とドライバー運転操作行動に与

*1. 9 車両開発本部
Vehicle Dev. Div.

*2-4 統合制御システム開発本部
Integrated Control System Dev. Div.

*5-8 パワートレイン開発本部
Powertrain Dev. Div.

える影響を示す。

2. G-Vectoring Controlの概要

山門らはこれまでの研究で、横運動に応じて前後運動を連係させるための基本的な制御指針として式(1)を提案した⁽⁴⁾。これを、前後・横のGのベクトルを統合制御するという意味で「G-Vectoring Control」と呼ぶ。

$$G_{xc} = -\text{sgn}(G_y \cdot \dot{G}_y) \frac{C_{xy}}{1+T_s} |\dot{G}_y| \quad (1)$$

ここで、 G_{xc} は車両前後方向の加速度指令、 C_{xy} は制御ゲイン、 G_y は車両の横加速度を時間で1回微分した横加加速度、 T_s は時定数である。基本的に横加加速度 G_y にゲイン C_{xy} をかけた値を前後加速度目標として車両に指令するというシンプルな制御則である。

この制御の作動フローをFig. 2に示す。車両が旋回を開始するときには相対的に G_x を減らすことで前輪荷重を増やして旋回応答性を改善し、定常旋回以降は G_x を増やして後輪荷重を増やすことで旋回安定性を改善するコンセプトである。このとき、前後加速度を縦軸、横加速度を横軸にとり、車両に発生している加速度様態を示す“G-G”ダイアグラムに表すと、乗員にとって不快な加速度変動がない、滑らかな曲線状に遷移する特徴的な運動となる。

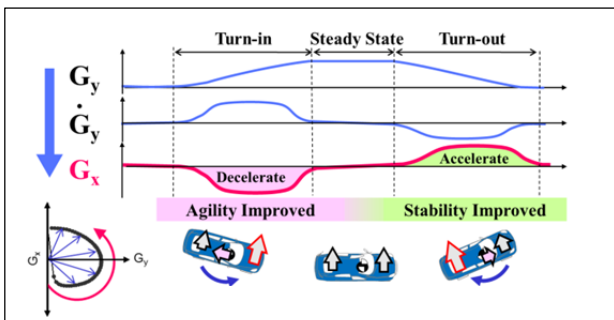


Fig. 2 Concept of G-Vectoring Control

著者らが市販車でGVC制御実装を検討する過程において、ゲイン C_{xy} の在り方や、車両のコンプライアンス特性も考慮した適合の在り方を検討してきた結果、エンジンブレーキ以下の人が気づかない程度の細密な減速度制御を行った場合には、運転の安心感ともいべき質感レベルの性能改善効果が得られることがわかってきた。具体的な効果については後述するが、一般的な走行領域においても、ドライバーにとってより制御しやすい車両へと進化させることができる。そこで、減速度制御の細密さの目標を0.01G程度と設定し、これを一般市販車両にて実現可能なアクチュエータを検討した。

3. エンジン制御によるシステム構成

GVC制御コンセプトを一般に市販する量産車両へ採用し、広く市場へ普及させるためには、現在の車両の主流パートレインであるエンジン（内燃機関）をアクチュエータとして制御を実現するのが最適な方策である。しかしながら、これまでパートレインを一般走行領域の車両横運動の制御装置として用いた事例はほとんどない。

一般的に、パートレインの制御応答性は電動パワーステアリング等のシャシー制御システムよりも遅く、実際、従来のエンジンではGVCを実現するのに十分な減速度応答と細密さが得られなかった。そこで、圧縮比の見直し等によって大幅に効率を改善し、同時に応答性と制御精度を高めた新世代のガソリンエンジンであるSKYACTIV-G及びディーゼルエンジンのSKACTIV-D⁽⁶⁾をアクチュエータとして用いることとした。

具体的には、目標加速度からそのときの車両状態を考慮して効率的に燃焼状態を決定する駆動力制御⁽⁶⁾の特徴を生かして、Powertrain Control Module (PCM) 内にGVCの制御ロジックを配置し、GVCの目標減速度と駆動力制御の目標加速度を調停して最終的なエンジントルクを決定する統合制御システムを開発した。制御指令 G_x を決定するための横運動状態 G_y は、ドライバーのインプット情報である操舵角と車両速度等の情報から推定される。システムの概念図をFig. 3に示す。

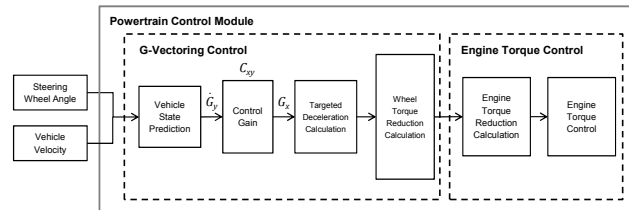


Fig. 3 GVC System Configuration

4. GVCによる車両運動性能の改善効果

4.1 実験車両

上記の量産型GVCによる車両のダイナミクス性能改善効果を、実車実験の結果から明らかにする。実験車両の諸元をTable 1に示す。車両はSKYACTIV-Dを搭載したマツダアテンザ（欧州名Mazda6）のFF車で、これに量産型GVCを実装して実験を行った（Fig. 4）。

Table 1 Test Vehicle Specifications

Length	4805	mm
Width	1840	mm
Height	1480	mm
Weight	1520	kg



Fig. 4 Test Vehicle

4.2 車両運動性能の改善効果

直進から旋回に至る走行を想定し、車速40km/hにて、Fig. 5に示す操舵角を自動操舵装置で与えた。

操舵入力により発生する横加加速度とGVC作動フラグの時間変化をFig. 6に示す。GVCは制御コンセプトどおりに、横加加速度の発生とほぼ同期して作動している。

この時の前内輪にかかる駆動力（タイヤ前後力）の変化をFig. 7に示す。GVC制御フラグの立ち上がりに遅れることなく、設計意図どおりに駆動力が変化している。

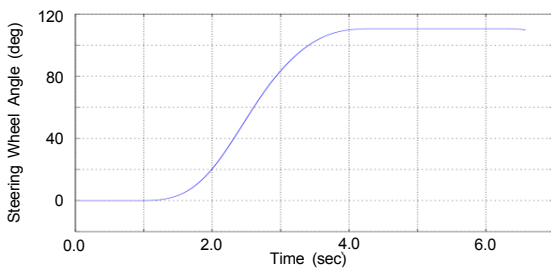


Fig. 5 Steering Input by Steer Robot

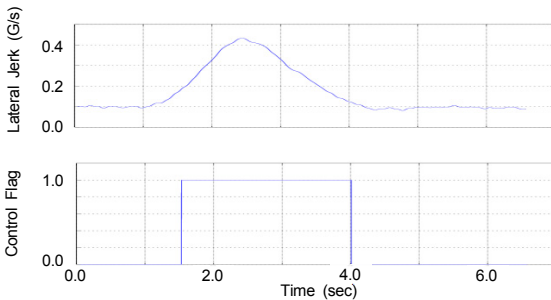


Fig. 6 Lateral Jerk and GVC Control Flag

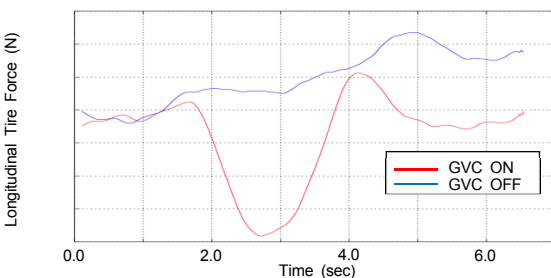


Fig. 7 Driving Force at Front Inner Wheel

制御による車両平面運動の改善効果として、G-GダイアグラムをFig. 8に示す。本システムは、旋回の初期から前後加速度と横加加速度をほぼ同期して遷移させ、ねらいどおり前後と横のGのつながりをスムーズにしている。

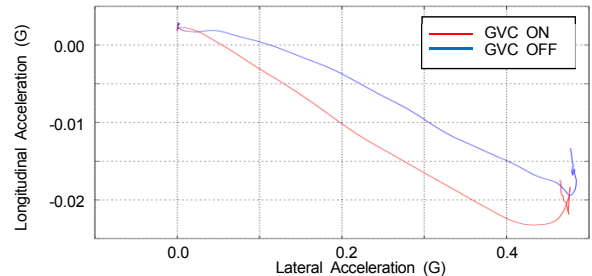


Fig. 8 G-G Diagram with/without GVC

次に、旋回中の車体姿勢改善効果として、ロールとピッチの関係がねらいどおりに制御できていることを確認する (Fig. 9)。この車両では、制御なしではロール時に過渡的にノーズがやや上がる傾向があるが、本システムはノーズダイブを伴うロール運動を実現している。

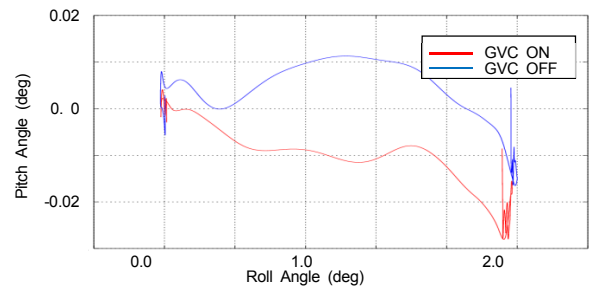


Fig. 9 Roll Angle and Pitch Angle with/without GVC

また、横加加速度0.25G時点での4輪のサスペンションストローク量をFig. 10に示す。旋回内外輪の伸長・圧縮に加え、前後輪のストロークの比較から、本システムが車両姿勢を前傾姿勢に保っていることが見て取れる。結果、ロールとピッチが同期したダイアゴナルロールが実現できている。

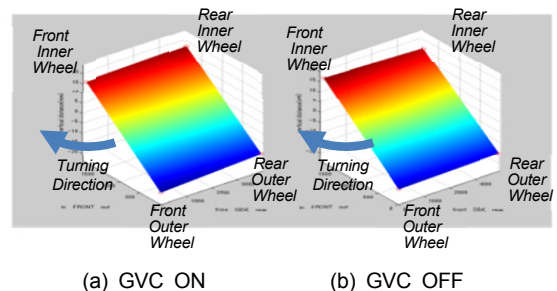


Fig. 10 Comparison of Suspension Stroke Mode

5. ドライバ運転操作の改善効果

上述のGVCによる車両運動の改善によって、実際のドライバ運転操作にどのような影響があるのかを評価した。評価方法は、同一車両でのGVC有・無の比較とし、一般道における日常のさまざまな運転シーンを想定したコースにて、制御仕様を切り替えて実験を行った (Table 2)。

Table 2 Test condition

Test case	Test Scene	Speed
1	Single corner	40km/h
2	Winding	60km/h
3	Lane Change	60km/h
4	Straight	80km/h

5.1 単一コーナーでの評価

Fig. 11に示すように、コーンによって通路を規制した単一コーナーを40km/h一定速で走行した。GVCによるドライバの操舵行動の変化を、操舵角と操舵速度の時刻変化を用いてFig. 12に示す。操舵角の変移と操舵速度のピークが減少していることから、GVCによってドライバの運転操作がゆっくりと穏やかになっている。

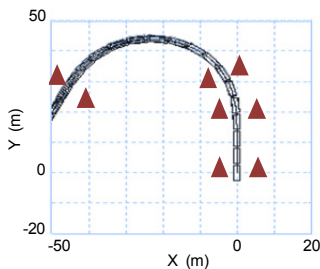


Fig. 11 Single Cornering Evaluation Course

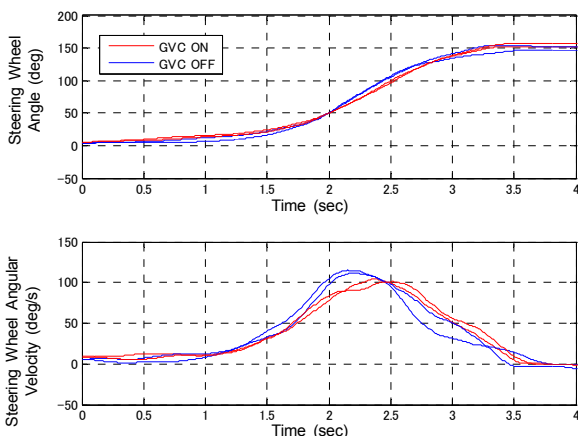


Fig. 12 Single Cornering (Steer-in) Driving Result

5.2 ワインディング走行での評価

次に、60km/hの一定速走行で、右200R, 右100R, 左100Rの連続したコーナーを経由するワインディング路で

の評価を行った。GVC有・無での操舵角と操舵速度の時刻変化をFig. 13に示す。GVC有・無のそれぞれで2周分の走行データを用いた。GVC有では、ドライバの細かい修正操舵が大幅に減少し、Fig. 12の結果と同様に、安定した操舵行動となっていることがわかる。また、同じデータに対してステアリングエントロピ (SE) 法[®]でドライバの修正操舵負担を分析した結果をFig. 14に示す。GVC無に比べて有のSEは半分程度まで小さくなっており、ドライバの負担が大幅に減少している。

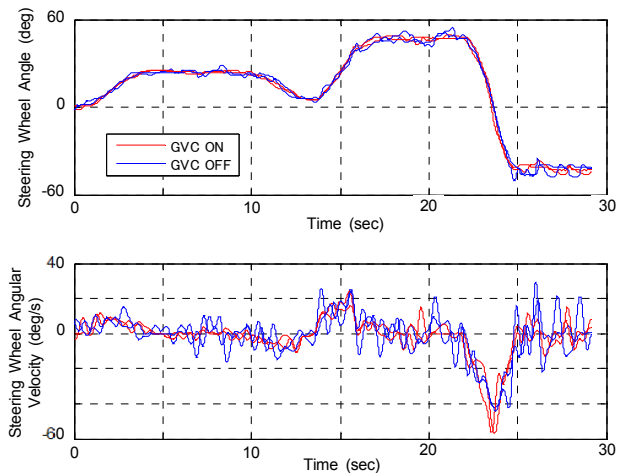


Fig. 13 Winding Course Driving Result

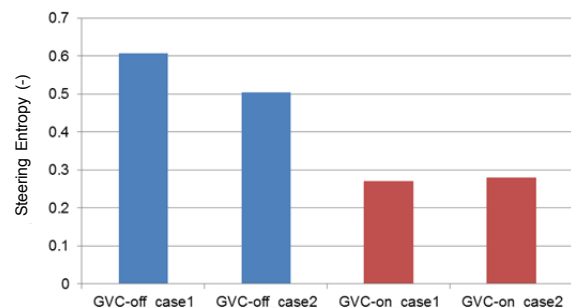


Fig. 14 Driver's Steering Workload (Steering Entropy Analysis)

5.3 レーンチェンジ走行での評価

Fig.15に示すコースを設定し、2車線道路における一般的なレーンチェンジを想定した評価を行った。車速は60 km/hの一定走行とした。

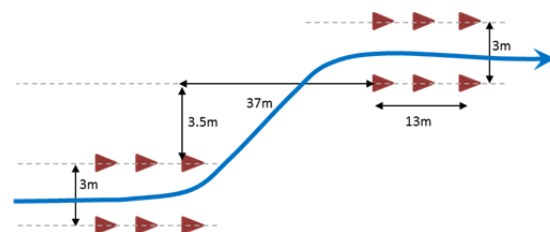


Fig. 15 Lane Change Evaluation Course

GVC有・無での操舵角，ヨーレート，横加速度の時刻変化をFig. 16に示す。ここでも，GVCによってドライバの操舵行動が安定かつ効率的に変化している。GVC無の場合には，第1操舵の切り戻しが遅れ，第2操舵に向けて急な操作となった結果，レーン移行後のヨーレート，横加速度がともに大きくオーバーシュートしている。これに対してGVC有では，ドライバによる操舵が漸進的でスムーズなものとなり，安定した操舵入力によって安定した車両挙動を導いている。ドライバ主観評価においても，特に第1操舵後半から第2操舵までの区間における切り戻し操作で大きな変化を感じており，安心して楽に運転できるというコメントを得ている。

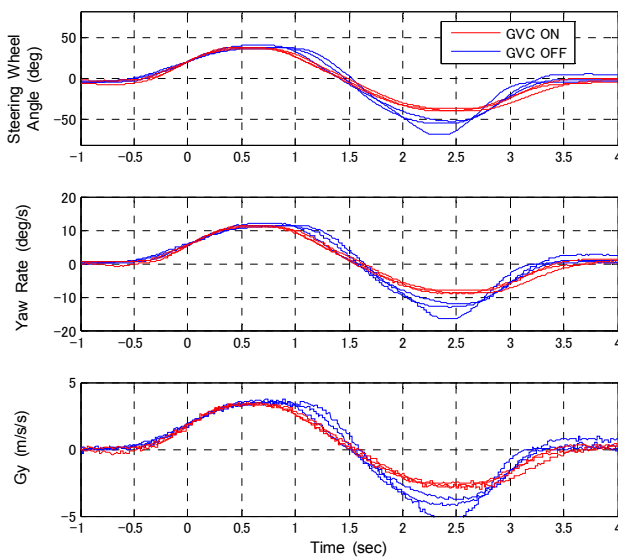


Fig. 16 Lane Change Result

5.4 高速直進走行での評価

直進走行評価は，高速道路での直進走行を模擬したものである。直進走行とはいえ，車両は路面のアンジュレーションやカント変化，あるいは風などの外乱入力を受けるため，ドライバは通常，微小な修正操舵を繰り返しながら走行することになる。そこで，Fig. 17に示すような幅4mの走行レーン内を車速80km/h一定で走行し，GVC有無でのドライバ操舵行動の変化を評価した。

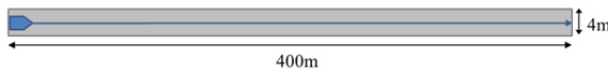


Fig. 17 Straight Evaluation Course

Fig. 18は，直進時のGVC有無での操舵角と操舵速度の時系列データの一例である。舵角ゼロ付近の微小舵角領域において，ドライバ操舵の変動幅が約半分減少している。つまり，路面外乱に起因する微小な車両挙動変化に対してドライバが行うわずかな修正操舵の領域においても，コーナーやレーンチェンジ同様のGVC効果が確認

できる。被験者からは，直進時の効果としてハンドルの据わりが良い，真っすぐ走る，リラックスして走れるといったコメントを得ており，修正操舵の減少そのものは意識していないことから，GVCはドライバが無意識下で感じているフィーリングの改善にも効果があるといえる。

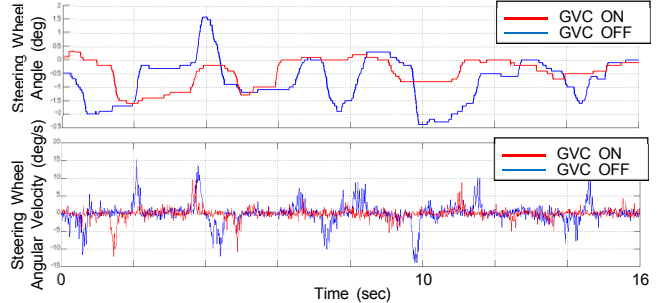


Fig. 18 Straight Driving Test Result

5.5 複数被験者での検証結果

前述したドライバ運転操作の改善効果について，その確からしさを検証するため，被験者を約70名に増やしてレーンチェンジ及び直進走行評価を実施した。

Fig. 19に，レーンチェンジにおけるドライバ操舵角の振幅（第一操舵と第二操舵のピーク間の操舵量）について，GVC無を1とした場合のGVC有の比率を示す。ほとんどの被験者が舵角の減少を示し，全体平均では7.1% (11.6deg) の減少が認められた。

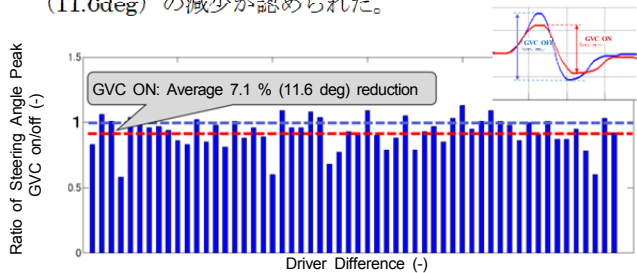


Fig. 19 Ratio of Steering Angle Operation Amount with/without GVC at Lane Change

Fig. 20には高速直進走行時のドライバ操舵角の標準偏差について，同様にGVC無に対するGVC有の比率を示す。操舵角の標準偏差によって直進中の修正操舵の大きさを表した。その結果，GVCによってドライバの修正操舵が全体平均で14.6%低減している。

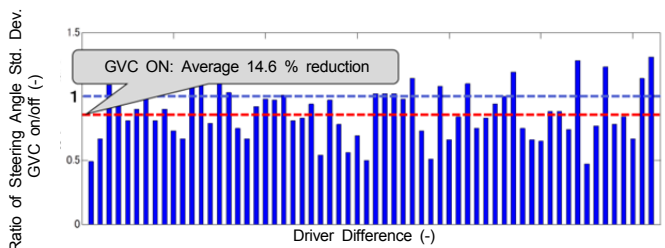


Fig. 20 Ratio of Steering Angle Standard Deviation with/without GVC at Straight Driving

以上の評価結果から、GVCはドライバー一般に対して運転操作を改善する効果があり、特に修正操舵の低減効果が高いといえる。

具体的には、GVCによって多くのドライバーが無駄な操舵をしなくなり、ゆっくりとした操舵で余裕を持った運転ができていたといえよう。また、運転中の無意識下の微小な修正操舵が少なくなることで、ドライバーの運転操作負担が低減し、結果としてダイナミクス性能のフィードバック向上につながったと考える。

6. ドライバーの官能評価結果

さまざまな国籍・スキルを持つ100名以上のドライバーで、欧州の高速道路を含む一般公道にてGVC有無の比較評価を行った。効果の感じ方に差こそあれ、GVCに対するネガティブな評価は一切なく、全員がGVC有をより高く評価した。一般的に、車両運動制御による効果は「硬い・柔らかい」や「俊敏・穏やか」といったバランスの問題として扱われることが多いため、人によって好みが変わるといわれる。しかしながら、今回のGVCでは嗜好性による評価の差は全くなく、ダイナミクス性能の質感向上に関する指摘が主であった。代表的コメントを以下に示す。

- 1) 車の動きに安定感がある
- 2) 車の動きが滑らかで乗り心地が良い
- 3) 運転が楽になる
- 4) 運転が上手くなったように感じる
- 5) 安心速度が高い
- 6) 一切の制御介入感がなく自然

これらは全て主観的な評価であるが、一方、これまでに明らかにした「ドライバーの修正操舵が明確に減少する」という事実と整合しており、意識的であれ無意識であれ、ドライバー自身もそれを感じ取っているといえる。

7. まとめ

・高応答なSKYACTIV-G、SKYACTIV-Dエンジンを用いた世界初の量産型 G-Vectoring Control (GVC) を実用化した。

・GVCによる車両運動性能の改善効果として、操舵に応じて駆動力制御によるわずかな減速度を付加することで、一般走行領域での滑らかなGのつながりと車両のダイアゴナル旋回姿勢を実現した。

・GVCによるドライバー運転操作の改善効果として、さまざまな走行条件下において、無駄な操舵をせず、ゆっくりとした余裕のある運転操作ができるようになる。

今後も、人にとってより制御しやすい車両のあり方に関する研究を推進し、運転の楽しさや安心感など、ダイナミクス性能のさらなる質感向上に取り組んでいく。

参考文献

- (1) 梅津大輔ほか：新型プレマシーダイナミックフィールの統一感、マツダ技報No.28, p.13-18, 2010
- (2) 村田親ほか：SKYACTIV-シャシーのダイナミクス性能、マツダ技報No.30, p.32-36, 2012
- (3) 山門誠，安部正人：加加速度情報を用いたドライバー制御特性の新しい解釈方法，自動車技術会論文集，Vol.38, No.4, p.29-34, 2007
- (4) 山門誠，安部正人：横運動に係りして加減速を制御する車両の運動特性に関する検討，自動車技術会学術講演会前刷集，No.8-08, p.9-14, 2008
- (5) 石野勲雄ほか：新世代技術「SKYACTIV パワートレイン」，マツダ技報，No.29, p.29-35, 2011
- (6) 杉山貴則ほか：SKYACTIV-Dの電子制御システム，マツダ技報，No.30, p.14-18, 2012
- (7) 梅津大輔ほか：高応答エンジンを採用した量産型G-Vectoring制御車両の開発，自動車技術会春季学術講演会前刷集，No.54-16, p.1310-1314, 2016
- (8) 中山沖彦，二見徹，中村友一，El-win R. Boer：運転者負担定量化手法「ステアリングエントロピー法」の開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.45-99, p.5-8, 1999

■ 著 者 ■



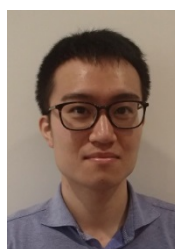
梅津 大輔



砂原 修



高原 康典



小川 大策



大久 千華子



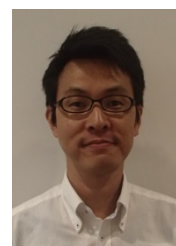
菅 俊也



氏原 健幸



椎葉 裕明



加藤 史律