

論文・解説

31

Kinematic Posture Control (KPC) の開発 Development of Kinematic Posture Control (KPC)

平賀 直樹^{*1} 緒方 博幸^{*2} 加藤 史律^{*3}
Naoki Hiraga Hiroyuki Ogata Fuminori Kato
梅津 大輔^{*4}
Daisuke Umetsu

要 約

一般的に、リアのロールセンター高はフロントに比べて比較的高めに設定されている。このようなリアのロールセンターが高い構成においては、旋回横加速度が大きいシーンで必要以上のジャッキアップ力をもたらし、旋回時に車体がもち上がるヒープ運動の発生により、ドライバーに不安感を抱かせることがある。そこで、旋回横加速度が大きいシーンに増大するヒープを抑制する手法を検討し、バネ上の車体姿勢を安定させる Kinematic Posture Control (以下、KPC) を開発した。本稿では、まず KPC の制御コンセプト及びシステム構成を紹介する。そして、KPC によって旋回中のヒープが抑制されることをフルビークルシミュレーションで確認した結果を紹介する。更に、KPC を搭載したロードスターを用いて、ドライバーの運転行動へ及ぼす効果を検証した実験結果を紹介する。KPC は旋回中のヒープを抑制することでドライバーが余裕をもった操作になることがわかった。

Abstract

Kinematic Posture Control (KPC) is the vehicle dynamics control concept that integrates suspension geometries and longitudinal tire force effect. At cornering, jack-up force occurs, enlarging the heave of a vehicle body, making the driver uneasy. KPC suppresses the heave and gives the driver a sense of ease. KPC controls the heave and stabilizes vehicle behavior by combining a rear suspension with anti-lift geometry incorporated and rear inner-wheel braking, which generates vehicle-body pull-down force. We propose the control concept, and report the evaluation results of the control effect using Roadster equipped with KPC.

Key words : Vehicle dynamics, Suspension system, Brake system, Motion control, Driving stability

1. はじめに

著者らは、Fig. 1 に示すように G-Vectoring Control Plus (以下、GVC Plus) の開発・適用を通して、コーナーターンインからターンアウトまでのバネ上の車体姿勢が、ドライバーの操作とフィーリングに影響を及ぼすことを明らかにしてきた⁽¹⁻³⁾。

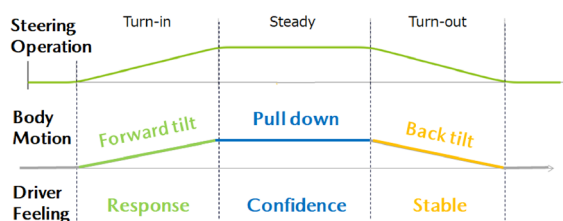


Fig. 1 Vehicle Dynamics Concept

ロードスターをはじめとする Rear-Wheel Drive (以下、RWD) 量産車のリアサスペンションジオメトリの一般的な特徴として、リアのロールセンター高がフロントに比べて比較的高くなっている。これにより、タイヤ横力による前後外輪のジャッキアップ効果に起因するもち上げ力が、フロントに比べて優勢となる。このジオメトリ効果を利用した結果として、Fig. 1 に示すターンイン時の前下がりピッチが自然に実現できる。しかし、リアのロールセンターが高い構成においては、旋回横加速度が大きいシーンで必要以上のジャッキアップ力をもたらされ、旋回時に車体がもち上がるヒープ運動が発生し、ドライバーに不安感を抱かせることがある。

そこで今回、RWD 車の旋回横加速度が大きいシーンに増大するヒープを抑制する手法を検討した。その結果、Fig. 2 に示すリアサスペンションのアンチリフトジオメ

*1~4 操安性能開発部
Chassis Dynamics Development Dept.

トリと旋回内後輪制動の組み合わせで発生するバネ上の車体を引き下げる力、アンチリフト力によりヒープを抑制し、バネ上の車体姿勢を安定させる新たな車両運動制御 Kinematic Posture Control (KPC) を開発した。本稿では、制御の概要とシステム構成に加え、KPC の効果を客観的・定量的に評価した結果について報告する。

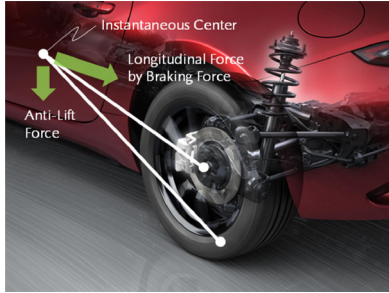


Fig. 2 Anti-Lift Force by Brake

2. KPC コンセプト

KPC は、サスペンションジオメトリと制動力の組み合わせによってヒープ抑制を実現する車両運動制御である。Fig. 3 に制御ロジックの概要を示す。コーナー旋回中のヨーレート r の発生に伴い、リアの左右車輪速 $V_{O,I}$ の差である V_{diff} が制御介入閾値 $V_{threshold}$ 以上となると、旋回内後輪へ制動力 F_{Rin} を付与することでヒープの抑制に必要なアンチリフト力 F_{AL} が車体に加わる。KPC で旋回内後輪に制動力を付与する制御は、Direct Yaw-Moment Control⁽⁴⁾ (以下、DYC：旋回内外輪の制駆動力差によってヨー運動を促進する制御) と類似しているが、制動力 F_{Rin} はヨー運動の促進効果がほとんど発生しない僅かな値に留めている。KPC は車両の平面運動を変えることなく、ヒープのみを制御するというコンセプトに基づいた制御である。

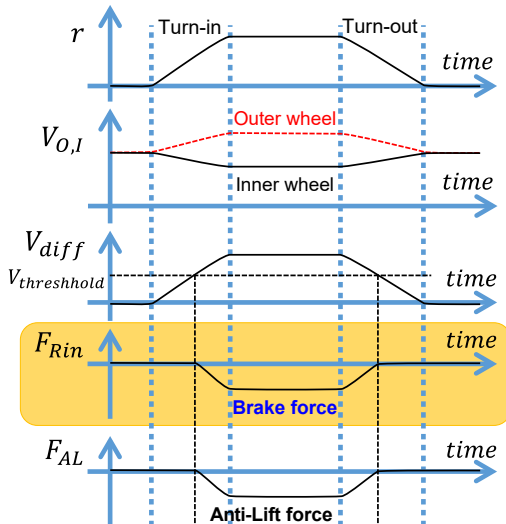


Fig. 3 Kinematic Posture Control Concept

車両に実装する際は、式(1)のように閾値を超えて左右の車輪速差 V_{diff} が発生した時に、旋回内輪の制動力 F_{Rin} を制御指令値とする。この制動力は、左右の車輪速差に対応して大小が決まる。

$$\begin{cases} V_{diff} = V_{Rout} - V_{Rin} & (V_{Rout} - V_{Rin} \geq V_{threshold}) \\ V_{diff} = 0 & (V_{Rout} - V_{Rin} < V_{threshold}) \end{cases}$$

$$F_{Rin} = \frac{C_{KPC}}{1 + Ts} V_{diff} \quad (1)$$

- V_{Rout} : リア外輪の車輪速
- V_{Rin} : リア内輪の車輪速
- T : 一次遅れ時定数
- C_{KPC} : KPC の制御ゲイン
- $V_{threshold}$: 制御介入を判断する閾値
- s : ラプラス演算子

より具体的な走行シーンを例に説明すると、Fig. 4 (i) に示す旋回半径が大きいコーナーでは左右の車輪速差が小さく、車両に発生する横加速度も小さいため、車両のヒープも小さい。一方、Fig. 4 (ii) に示す旋回半径が小さいコーナーでは、左右の車輪速差が大きく横加速度も大きいため、車両のヒープも大きくなる。従って、左右の車輪速差を考慮した制御により、自動的に旋回半径の大小に応じた制御量の大小が適合可能となる。また、左右の車輪速差を用いることで、カウンタステアなど旋回方向と逆方向にドライバーのハンドル操作が行われた場合も、車両の旋回方向に対する適切な方向への制御実行が可能である。

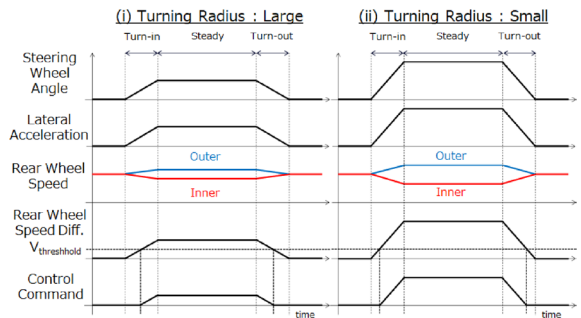


Fig. 4 Control Operating Concept Depending on the Turning Radius

また、左右の車輪速差は走行シーンだけでなく、車両の仕様差によっても異なる。例えば、Fig. 5 (i) に示す差動装置が搭載されたオープンデフ車に対して、Fig. 5 (ii) に示す差動制限装置である Limited Slip Differential (以下、LSD) 搭載車は左右の車輪速差が制限されるとともに、駆動力の左右差によってヨー運動が抑えられるため、安定性が高くヒープに対する不安感も低減される。そして、この車輪速差が小さくなる LSD 搭載車では、KPC は弱く作動する。車輪速差を参照することで、走行シーンだけでなく実装する車両特性も自然に考慮され、適切な制御量を演算することが可能となる。

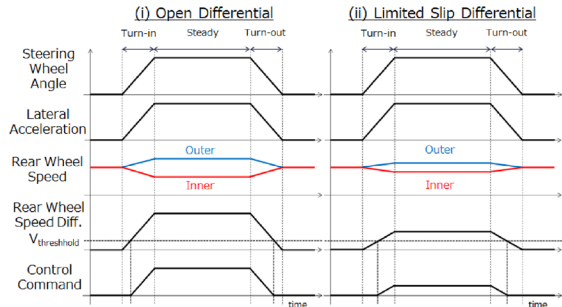


Fig. 5 Control Operating Concept Depending on the Different Configuration of Differential

3. KPC を搭載する車両と実装

3.1 車両諸元とサスペンションジオメトリ

KPC は、リアのサスペンションジオメトリに応じて、さまざまな車両に適用できる制御方法である。本稿ではその一例として、Table 1 の車両諸元であるロードスター (Fig. 6) に KPC を搭載して検証した結果について報告する。

Table 1 Vehicle Specifications

Dimension	Value	Unit
Vehicle mass	990	kg
Wheel base	2.310	m
Front tread	1.495	m
Rear tread	1.505	m
Height of C.G	0.480	m
Front anti-dive angle	3.7	deg
Rear anti-lift angle	22.2	deg



Fig. 6 Test Vehicle

3.2 KPC の実装

Fig. 7 に KPC のシステム構成図を示す。車両の Controller Area Network (CAN) 信号を通して車両の状態量を検出し、Powertrain Control Module (PCM) 内で式 (1) の KPC コンセプトに基づく演算を行い、Brake Control Unit (BCU) へ制御指令を出力する。市販車両に装着が義務化されている横滑り防止装置 Electronic Stability Control (ESC) を利用しており、KPC を搭載する上で追加が必要な装置はない。

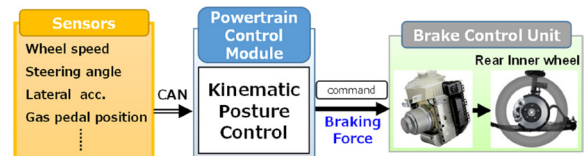


Fig. 7 Control System Configuration

4. フルビークルシミュレーションによる検証

4.1 フルビークルシミュレーションによる検証

(1) 車両運動モデル

2 章で述べた KPC コンセプトの有効性を検証するため、先行研究⁽⁵⁾ の車両運動モデルを用いて、フルビークルシミュレーションを行った。このモデルは、平面運動に加えてばね上の 3 次元運動を再現する力学モデルであり、サスペンション機構を考慮している。サスペンションを通して、タイヤの前後・横力が車体に伝わり、発生するバネ上車体のロール、ピッチ及びヒープを解析できる。なお、シミュレーションで用いた車両諸元は Table 1 と同じである。

(2) シミュレーション結果

シミュレーション条件は、Fig. 8 に示すように、車速 54 [km/h] で進入し、操舵角を 80 [deg] まで切り込んでから切り戻す U ターン旋回とした。KPC ありの場合は、実走行車両で発生する平均的な制御量として、ピーク値が約 30 [N] (ブレーキ液圧換算で約 0.1 [MPa]) の制動力を旋回内後輪に付与した。

KPC OFF に対する ON の切り込み操舵途中の過渡的な車両の平面運動とバネ上車体姿勢の変化を確認するため、切り込み側の操舵角 60 [deg] 時点における KPC OFF に対する ON の各車両運動パラメーター変化を Table 2 に示す。

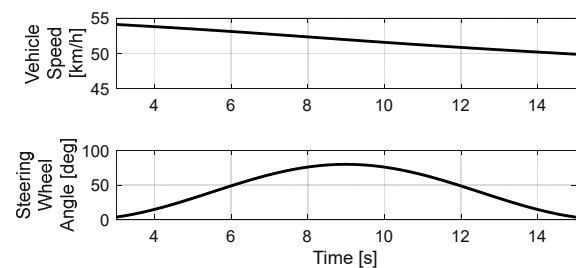


Fig. 8 Simulation Conditions

Table 2 Change of Response by KPC on Simulation at Steering Wheel Angle=60 [deg]

Parameters	Rear Inner Wheel
Yaw Rate	0.08% Increase
Roll Angle	0.34% Decrease
Pitch Angle	0.55% Increase
Heave	3.16% Decrease

操舵角 60 [deg] 時点のヨーレイトは 0.08% 増で、KPC ON/OFF での変化はほぼない。また、ロール角とピッチ角についてもそれぞれ 0.34% 減及び 0.55% 増であり、KPC ON/OFF でほぼ変わらない。一方、ヒープは 3.16% 減となり他の変化と比べて大きい。切り込み側の操舵に対するヨーレイトとヒープの関係をリサージュ波形でみても、ヨーレイトは KPC ON/OFF で差がほとんどないが、ヒープは KPC ON で小さくなっていることが分かる (Fig. 9)。このように、旋回中の操舵に対するヨーレイトの応答が小さい範囲で、旋回内後輪に制動力を発生させることにより、ヨー・ロール・ピッチ運動を変化させず、ヒープのみ抑制できることを確認した。

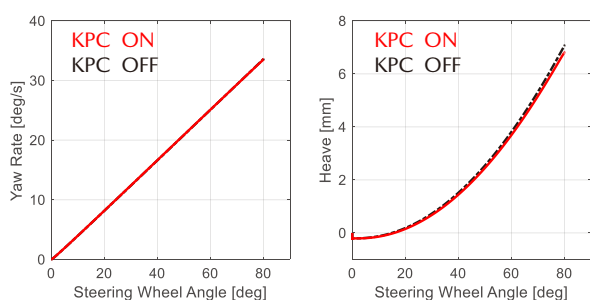


Fig. 9 Lissajous Graph of Simulation

ここで、KPC で制動力を付与する旋回内後輪以外の輪に、KPC 同様の制動力を発生させた場合のヨー・ロール・ピッチ及びヒープ運動について調べた結果を Table 3 に示す。旋回内外の前輪の場合、特にピッチ角が約 3~4% 増と大きく、ヒープ変化はほぼない。しかし旋回外後輪の場合、ヒープは 4.70% 減で Table 2 に示す旋回内後輪に比べて大きく (約 1.1 倍)、ヨーレイトも同様に 0.37% 減と大きい (約 4.6 倍) ため、旋回内後輪と同様にヒープの抑制が可能一方で、ヨー運動を減衰させる力が発生しやすいことが分かる。

Table 3 Change of Response by Each Wheel Braking on Simulation at Steering Wheel Angle=60 [deg]

Parameters	Front Inner Wheel	Front Outer Wheel	Rear Outer Wheel
Yaw Rate	0.08% Increase	0.36% Decrease	0.37% Decrease
Roll Angle	0.09% Decrease	0.54% Decrease	0.30% Decrease
Pitch Angle	4.15% Increase	2.96% Increase	0.93% Decrease
Heave	0.65% Increase	0.74% Decrease	4.70% Decrease

以上の結果より、制御輪が旋回内後輪の場合、ある制動力の範囲内であればヨー・ロール及びピッチ運動をほとんど変化させることなく、ヒープのみ抑制が可能であることを確認した。Table 1 に示すように、今回 KPC を実装する車両はリアのアンチリフト角が 22.2 [deg] と大きく設定されているため、僅かな制動力で大きなアンチ

リフト力が発生する。このため、ヨー運動を変化させることなく、車体のヒープを抑えることができる。

4.2 実走計測による検証

(1) 走行モード

4.1 節の机上シミュレーションと同様に進入車速 54 [km/h]、最大操舵角 80 [deg] 程度の U ターン旋回における実走行での KPC 効果検証を実施した。進入前の直進中に車速を合わせ、その後は計測用の専用装置でアクセル開度を一定に制御し、ドライバーはステアリング操作のみ行って旋回する。インフォームドコンセントを行った上で、できる限り同様の走行を被験者に指示し、実験を行った。実測した走行軌跡を Fig. 10 に示す。KPC ON を赤線、KPC OFF を黒線で示しており、KPC ON/OFF にかかわらず同様の軌跡で走行していることが分かる。

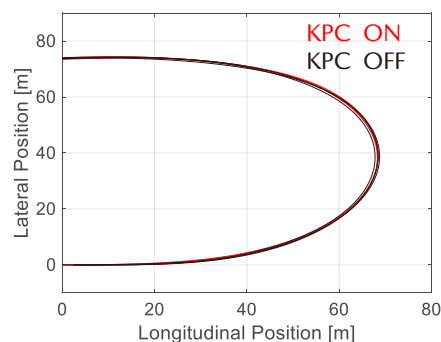


Fig. 10 Trajectory

(2) 計測結果

計測した結果を Fig. 11 に示す。なお、ヒープは車両の四隅に取り付けた対地車高計の計測値から求め、PCM 内の KPC フラグを他の計測値と同期して計測した。

Fig. 10 と同様に KPC ON を赤線、KPC OFF を黒線で示しており、図中の KPC フラグより 5~7 秒の間で KPC が作動していることが分かる。KPC 作動中のヒープを比較すると、KPC ON ではヒープが小さい。ヒープが抑制された後、7 秒以降の操舵角が KPC ON/OFF で異なる。KPC ON の場合滑らかに切り戻しているが、KPC OFF では切り戻し初期が急峻な操舵をしている。また、ヨーレイトについて 7 秒以降は操舵角が変わり違いが生じているが、KPC 作動前はほとんど差がない。Fig. 12 左図は、操舵角とヨーレイトの関係を示しており、KPC ON/OFF で差がないことが分かる。一方、右図のヒープは KPC ON/OFF で明らかな差が見られ、KPC によって 1 [mm] 程度ヒープが小さくなったことが分かる。

以上のように、U ターン旋回を KPC ON/OFF で比較した結果、4.1 節のフルビークルシミュレーション結果と同様に KPC によってヨーレイトはほとんど変わらず、ヒープは KPC ありで小さくなることを確認できた。また、ヒープの減少によりドライバーの操舵行動が変わり、

更にKPC作動により切り戻し操舵が滑らかになる効果もある。旋回中のヒープを抑えることで、ドライバーは高周波を含む急峻な操舵を行わず、余裕をもった操作が可能になることが確認できた。

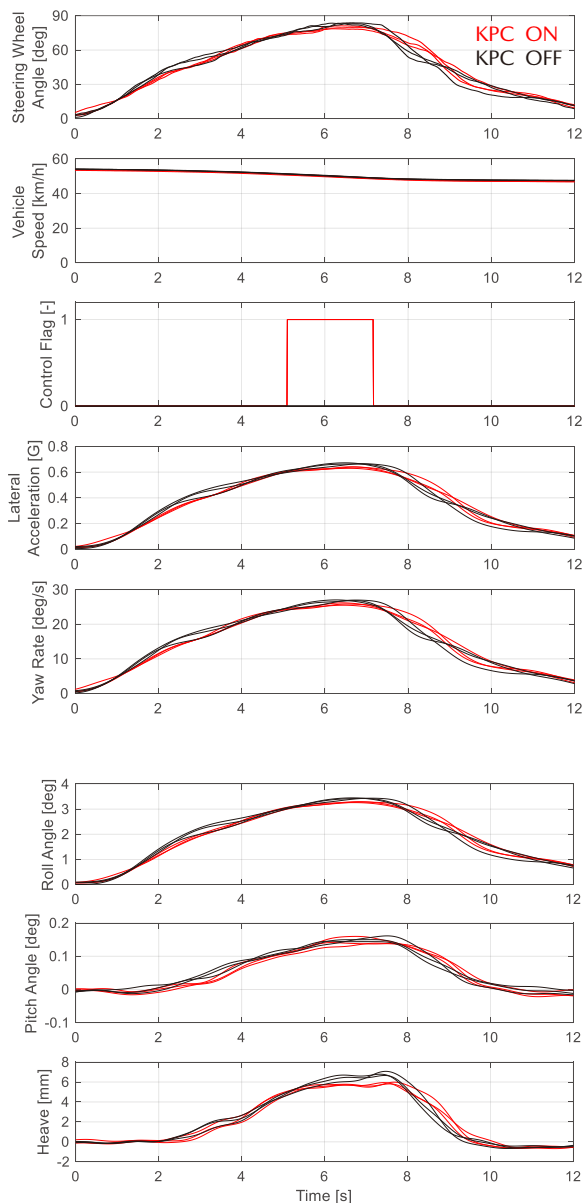


Fig. 11 A Vehicle Time History during Experiment

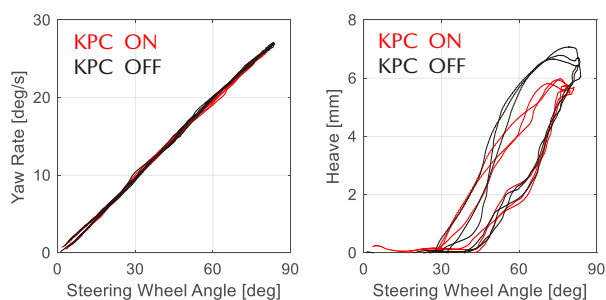


Fig. 12 Lissajous Graphs of Experiment

4.3 一般道走行での検証

4.2節と同様に、車両の四隅に対地車高計を取り付けヨーロッパ郊外のワインディング路での走行を実施した。コーナー旋回中（横加速度=0.45 [G] 時点）のパネ上車体姿勢を表したコンター図を Fig. 13 に、その時の車両中心点の上下動を Fig. 14 に示す。KPC によって車体の旋回姿勢が浮き方向から沈み方向へ逆転していることが分かる。一般道においてもねらいどおりのヒープ抑制効果があることを確認した。

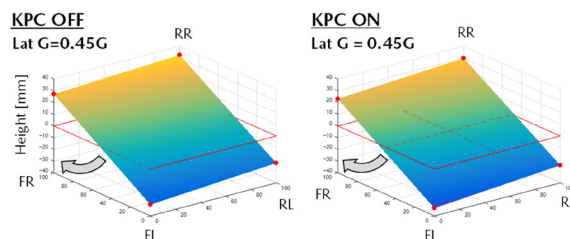


Fig. 13 A Vehicle Body Attitude at Public Road

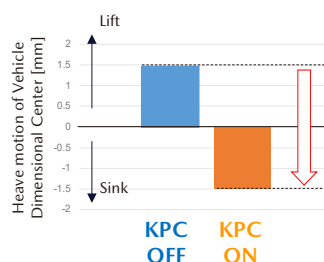


Fig. 14 Heave Motion of Vehicle Dimensional Center during Cornering

また、欧州一般道の厳しい道路環境を再現した車速や旋回横加速度が高く、路面アンジュレーションの多いNürburgringを走行した時の時系列波形をKPC ON/OFFで比較した結果を Fig. 15 に示す。図中A部において、黒線で示すKPC OFFでは車両の浮き上がりによってドライバーが不安に感じ、アクセルペダルを抜いてしまうシーンにおいても、赤線で示すKPC ONは制御の作動によるヒープ抑制によって接地感が高まり、アクセルペダルの修正操作なく、コーナー脱出に向けて加速できていることを確認した。

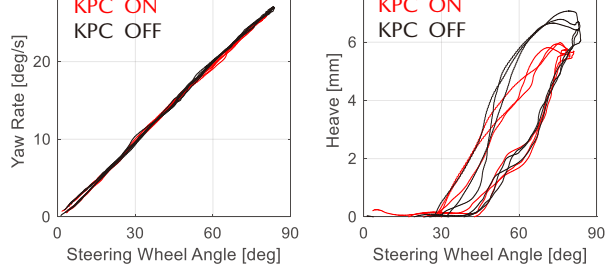


Fig. 15 A Vehicle Time History during Cornering at Nürburgring

これらの結果を受け、一般ドライバーを含めた多数の国内外ドライバーを対象に、KPC 有無比較による官能評価を行い、得られたコメントを以下に記す。Fig. 1 で示した車両運動コンセプトのねらいどおり、旋回中のヒープを抑制することでドライバーの操作に余裕が生まれ、自信をもった操作が行えるようになったことが確認できる。KPC 評価コメント)

- ・コーナーターンインから脱出にかけて、浮き方向のロールが抑えられ、接地感の改善効果を感じる。
- ・アンジュレーションのあるコーナーで内輪側の接地感が向上している。
- ・S 字コーナー切り返しでの操舵のつながりが良い。
- ・コーナー脱出にかけてリアが安定しているので、アクセルを踏んでいける。

5. おわりに

コーナー旋回中のリアでの左右輪速差に応じて車体姿勢を制御する KPC を開発した。DYC は左右輪の制駆動力差によってヨーモーメントを付与するが、KPC は制御によって発生させる制動力が著しく小さい。このため、車両に発生するヨーモーメントは僅かであり、ヨー運動はほとんど変化しない。一方でヒープについては、サスペンションジオメトリと組み合わせた増幅作用で、机上シミュレーション結果及び実車計測でも低減していることを確認した。KPC はヒープを抑制することで、ドライバーが体感する車両姿勢を安定させ、操舵を滑らかにする効果がある。先行研究⁽⁶⁾でも述べられているとおり、これまで検討してきた制駆動力制御による前後加速度やピッチに加え、ヒープもドライバー操作に影響することが確認できた。

参考文献

- (1) 梅津ほか：G-Vectoring Control の開発，[マツダ技報](#)，[No.34](#)，pp.99-104 (2017)
- (2) 梅津ほか：G-Vectoring Control Plus の開発，[マツダ技報](#)，[No.36](#)，pp.235-240 (2019)
- (3) 藪中ほか：G-Vectoring 制御が人の視線や身体挙動に与える効果に関する分析，自動車技術会 2020 年春季大会 学術講演会 講演予稿集，20215051 (2021)
- (4) 芝端ほか：ヨーモーメント制御による車両運動性能の向上について，自動車技術，Vol.47，No.12，pp.54-60 (1993)
- (5) 関谷ほか：ばね上 3 次元車両運動の簡易な記述式車両運動モデルによる運動評価，自動車技術会 2017 年秋季大会 学術講演会 講演予稿集，20176253 (2017)
- (6) 長島ほか：制駆動力制御によるヒープが操舵特性評価に及ぼす影響，自動車技術会 2019 年秋季大会 学術講演会 講演予稿集，20196026 (2019)

■ 著 者 ■



平賀 直樹



緒方 博幸



加藤 史律



梅津 大輔