

論文・解説

25

## ASYMMETRIC LIMITED SLIP DIFFERENTIAL の開発

### Development of Asymmetric Limited Slip Differential

山本 航輝<sup>\*1</sup> 平賀 直樹<sup>\*2</sup> 高橋 宏治<sup>\*3</sup>  
Koki Yamamoto Naoki Hiraga Koji Takahashi

#### 要約

デファレンシャルギアの差動制限力によって車両に発生する復元方向のヨーモーメントに着目して、新たに ASYMMETRIC LIMITED SLIP DIFFERENTIAL (Asymmetric LSD) を開発し、ロードスター／ロードスター RF に採用した。加速時、減速時それぞれに適切な差動制限力を付与することで、コーナリング時の安定性と軽快感を高次元でバランスさせるという技術コンセプトを軽量・コンパクトで耐久性の高い円錐クラッチ型の Limited Slip Differential (LSD) にカム機構を追加し、減速時と加速時で異なるカム角を設定することで実現した。本稿では、まず Asymmetric LSD のコンセプトと構造について紹介する。そして、LSD の差動制限特性に応じて、車両運動がねらいどおりに変化することをフルビークルシミュレーションと実車計測で確認した結果を紹介する。更に、LSD の特性が外乱安定性に与える影響について検討した結果を紹介する。Asymmetric LSD の採用によって、日常域から高速域までの旋回性と安定性を両立できた。

#### Abstract

A newly developed Asymmetric Limited Slip Differential (Asymmetric LSD) has been installed in the Roadster/Roadster RF. We focused on the effect of the restoring yaw moment generated in the vehicle due to the differential limiting force of the differential gear. The technical concept is to provide a suitable differential limiting force during acceleration and deceleration, respectively, to achieve a high balance between stability and agility during cornering. This concept was realized by adding a cam mechanism to a lightweight, compact, and durable conical clutch-type Limited Slip Differential (LSD) and setting different cam angles for deceleration and acceleration. This paper introduces the concept and structure of the Asymmetric LSD and reports the results of full vehicle simulations and actual vehicle measurements that confirmed the vehicle dynamics change as intended according to the differential limiting characteristics of the LSD. Furthermore, we present the results of our investigation into the impact of LSD characteristics on disturbance stability. The adoption of an Asymmetric LSD has enabled us to achieve a balance between cornering performance and stability across a range of speeds, from everyday driving to high-speed conditions.

**Key words** : Power transmission, Differential/Final reduction gear, Vehicle dynamics, Driving stability

### 1. はじめに

従来から、制駆動力制御による車両ヨー運動の性能向上手法が提案されてきた<sup>(1~3)</sup>。近年では、デファレンシャル（以下、デフ）の摩擦、すなわち差動制限力による車両運動への影響を考慮した研究<sup>(4,5)</sup>が報告されている。この差動制限力を強めたデフが Limited Slip Differential（以下、LSD）と呼ばれる装置である。従来の LSD 開発では、トラクション性能や雪上、悪路等での走破性の向上を目的とすることが多い。また、サーキット

ト走行のようなシーンを想定して LSD を搭載するというユーザーも多く、車輪の空転を抑制するトラクション性能への効果が一般的に広く認識されている。一方で、街中のような日常の走行シーンでも LSD の差動制限力によるヨーモーメントが発生し、常にダイナミクス性能に影響を与えている。

一般的に、トルク感応型の機械式 LSD を搭載した車両の特徴として、制駆動力がタイヤ摩擦円内であれば旋回内輪側のトルクが増加し、旋回外輪側のトルクが減少することで復元方向のヨーモーメントが発生するため、差

\*1~3 操安性能開発部  
Chassis Dynamics Development Dept.

動装置（以下、オープンデフ）を搭載した車両と比較してアンダーステア傾向が強い。一方、横加速度が大きく、旋回内輪の接地荷重が減少して駆動力がタイヤ摩擦限界を超え、旋回内輪が空転する場合、旋回内輪に対して外輪側のトルクが増加することで促進方向のヨーモーメントが発生する。また、差動制限機構を搭載している車両では、路面外乱や横風入力など、車両に外乱が作用した場合の平面運動に影響を与えるという研究結果<sup>(6)</sup>もあり、この観点も考慮して開発を進めていく必要がある。

今回、著者らはLSDの差動制限力によって車両に発生する復元方向のヨーモーメントに着目し、新型の機械式LSDであるASYMMETRIC LIMITED SLIP DIFFERENTIAL (Asymmetric LSD)を開発した。本稿では、車両運動に対するLSDによる差動制限の効果と実車への適用例について検討した結果を報告する。

## 2. Asymmetric LSDの開発コンセプト

ロードスターをはじめとする後輪駆動車は、一般的に高速走行における急減速時に駆動輪の接地荷重が減少し、ヨー挙動が不安定になりやすい。

そこで今回、LSDの差動制限力によって発生するヨー復元モーメントに着目し、減速旋回シーンの安定性向上を含む、下記(i)~(iii)のねらいを実現する差動制限特性を検討し、日常域から高速域まで旋回性と安定性を両立することをねらいとして、新型LSDを開発した。

- (i) 日常域の旋回性と安定性の向上
- (ii) 高速走行における減速旋回時の安定性向上
- (iii) 旋回内輪空転時の車両挙動のアクセルコントロール性向上

具体的には、(i) 日常域で発生する制駆動力の範囲において影響が大きいプリロードによる差動制限力を小さくすることで、旋回性を妨げるヨー復元モーメントを低下し、旋回性を向上するとともに、路面からの外乱入力によるヨー方向の車両応答を低減し、結果的に安定性を向上する。また、(ii) 高速走行でコーナ進入時の減速度が大きく、駆動輪である後輪の接地荷重が減少し、車両挙動が不安定になるシーンで、減速側の差動制限力を大きく設定することで、ヨー復元モーメントによって車両挙動を安定化する。(iii) 旋回内輪空転が発生するシーンでは、エンジンが発生可能なトルクに適した差動制限力に設定することで、トラクション性能を維持するとともに、不要なヨー促進モーメントの発生を抑制することをねらいとした。

## 3. Asymmetric LSDの構造と搭載車両

### 3.1 Asymmetric LSDの構造

Fig. 1に今回開発したAsymmetric LSDのカットモデルを示す。2章で述べた開発コンセプトを実現するため、先代のトルクセンシング式スーパーLSD (Super LSD)を

ベースとして、Fig. 2に示すように、サイドギアとカムリングにカム機構を設けることで、加速側 (Drive側) と減速側 (Coast側) それぞれに対して異なる差動制限特性を設定できる構造とした。また、サイドギアとカムリング間に皿バネを設けることで、サイドギア全周に安定したプリロードを付与できるようにした。Fig. 3に差動制限時 (減速側) のイメージ図を示す。差動時は入力トルクに応じて、カムでスラスト力が発生し、カムリングとデフケースに固定されたテーパリング間の摩擦によって差動を制限する機構である。

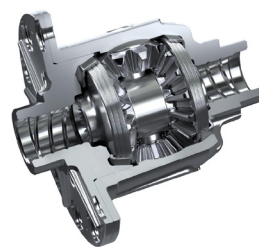


Fig. 1 Structure of Asymmetric LSD



Fig. 2 Components of Asymmetric LSD

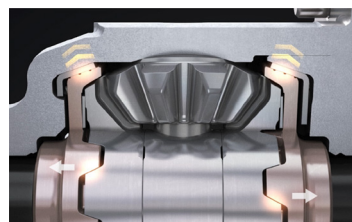


Fig. 3 Differential Limiting Mechanism (Deceleration side)

### 3.2 車両諸元

以下では、Table 1の車両諸元であるマニュアルトランスミッションのロードスター (Fig. 4) にAsymmetric LSD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	1050	kg
Wheelbase	2.310	m
Front tread	1.495	m
Rear tread	1.505	m
Height of C.G.	0.482	m

※開発車両の諸元値



Fig. 4 Test Vehicle

### 4. LSD 効果の検証

#### 4.1 シミュレーションでの検証

##### (1) 車両運動モデル

2章で述べた、Asymmetric LSD の開発コンセプトの有効性を検証するため、先行研究<sup>(7)</sup>の車両運動モデルに、後述するデファレンシャルモデルを追加し、フルビークルシミュレーションを実施した。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も考慮している。シミュレーションで用いた主な車両諸元は Table 1 と同じである。一般的に、デフケースに入力される駆動トルク  $T$  はデファレンシャルギアにより左右輪に等分され、デフ機構全体で生じる摩擦トルク  $T_{LSD}$  (正負で向き考慮) が片方の車輪には加算、もう一方の車輪では減算される。ただし、デフケースにはファイナルギアで減速をした後のトルクが入力されるものとする。

$$\begin{aligned} T_L &= T / 2 - T_{LSD} \\ T_R &= T / 2 + T_{LSD} \end{aligned} \quad (1)$$

$T_{L,R}$  は左右輪のトルクであり、 $T_{LSD}$  は次式で与えられる。

$$T_{LSD} = \text{sgn}(\omega_L - \omega_R) \cdot \text{Min} \left[ C \left| \frac{\omega_L - \omega_R}{2} \right|, T_C \right] \quad (2)$$

$\omega_{L,R}$  は左右輪の回転角速度、 $C$  は十分大きな定数である。 $T_C$  は差動時の左右輪間トルクであり、伝達トルクに比例すると仮定して、

$$T_C = \alpha \left| \frac{T}{2} \right| + T_0 \quad (3)$$

で表される。 $\alpha$  は正の比例定数であり、一般的にロック率と呼ばれている。 $T_0$  は初期摩擦トルクである。

Table 2 に Super LSD と Asymmetric LSD の特性値を示す。ただし、 $\alpha$  の添え字 D, C は Drive 側, Coast 側を意味する。また、1 輪分の駆動トルク  $T/2$  と摩擦トルク  $T_{LSD}$  の関係は Fig. 5 となり、Fig. 5 において、 $T/2 = -110$  [Nm] を境に摩擦トルクの大小関係が入れ替わる。なお、本検討で使用した車両は車速 50 [km/h] の直進定常走行中に、 $T/2 = -110$  [Nm] をステップ入力すると、 $-0.085$  [G] 程度で減速する。以降では、左右輪のトルク差  $2T_{LSD}$  を差動制限トルク (Differential Limiting Torque) と呼ぶ。

Table 2 LSD Parameters

	$\alpha_D$	$\alpha_C$	$T_0$
Super LSD	0.3333	0.3333	16.3
Asymmetric LSD	0.2593	0.3939	9.6

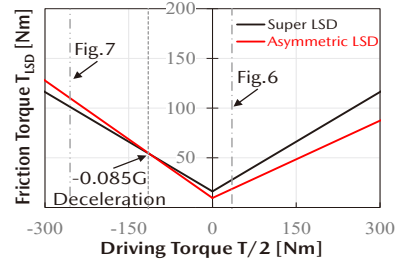


Fig. 5 Friction Torque of LSD

##### (2) Drive 側のシミュレーション結果

まず、Drive 側の差動制限特性が車両運動に与える影響を検討する。シミュレーション条件は、車速 50 [km/h] から操舵角を 110 [deg] まで切り込んで保舵する旋回とし、駆動トルク  $T$  は直進時に車速 50 [km/h] を維持できる値で 70 [Nm] とした。Fig. 6 に Asymmetric LSD の結果を赤線、Super LSD の結果を黒線で示す。Fig. 5 に示すように、 $T/2 > 0$  の領域では、Super LSD に対して Asymmetric LSD は初期摩擦トルク  $T_0$  と Drive 側のロック率  $\alpha_D$  がともに小さいため、差動制限トルクが小さくなっていることが分かる。その結果、差動制限トルクによって発生するヨー復元モーメントが減少することで、ヨーレイトが増加しており、操舵に対するヨー応答が向上することを確認した。今回、Asymmetric LSD は  $T_0$  を小さくしたことで、Fig. 5 に示すように、 $T/2 > -110$  [Nm] の範囲では差動制限トルクが小さいため、Fig. 6 の結果と同様に、操舵に対するヨー応答が向上する傾向である。

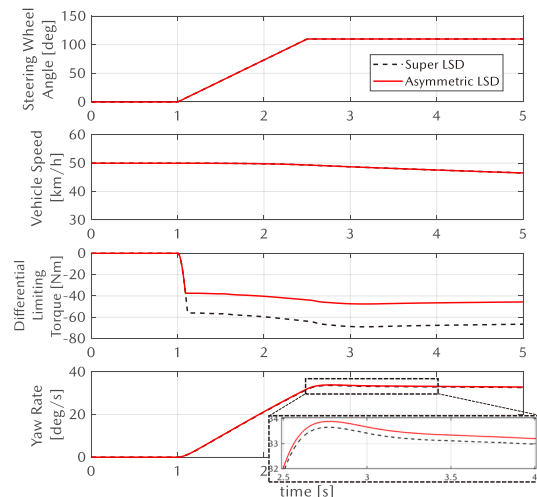


Fig. 6 A Vehicle Time History during Simulation (Steady Turn)

(3) Coast 側のシミュレーション結果

次に、Coast 側の差動制限特性が車両運動に与える影響を検討する。4.1(2)項で述べたように、 $T/2 > -110$  [Nm] の範囲では Super LSD に対して Asymmetric LSD は差動制限トルクが小さいため、ここでは Asymmetric LSD の方が差動制限トルクが大きくなる  $T/2 < -110$  [Nm] の領域についてシミュレーションを実施した。4.1(2)項と同様の操舵角、車速の条件において、操舵開始と同時に 0.2 [s] で約 -0.2 [G] の前後加速度が発生する減速旋回のシミュレーションを実施した。その結果を Fig. 7 に示す。Asymmetric LSD は Super LSD と比べて Coast 側のロック率  $\alpha_c$  が大きいため、 $T/2 < -110$  [Nm] の領域では Asymmetric LSD の方が差動制限トルクが大きくなる。その結果、Fig. 7 に示すように、ヨー復元モーメントが増加することで、ヨーレイトが減少して、安定性が向上することを確認した。

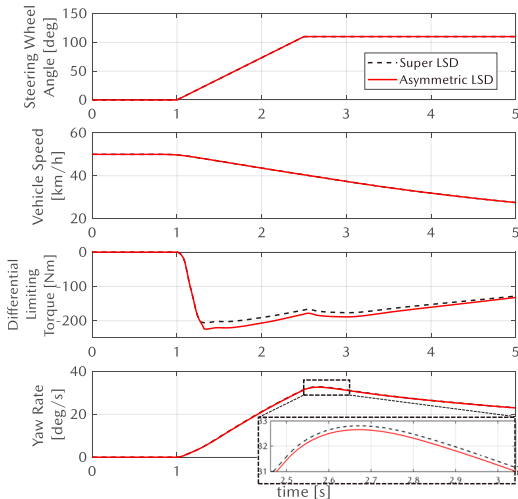


Fig. 7 A Vehicle Time History during Simulation (Deceleration Turn)

4.2 実車での検証

(1) 机上シミュレーションとの比較

まず、4.1(2)項の机上シミュレーションと同様の走行条件において、実走行での効果検証を実施した。旋回前の直進中に車速を合わせた後は、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で旋回する。ドライバーには、インフォームドコンセントを得て、できる限り同じステアリング操作で走行するように指示し、実験を行った。結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 より、Asymmetric LSD と Super LSD それぞれの操舵角と車速からほぼ同じ走行ができていると判断できる。Fig. 6 のシミュレーション結果と同様に、Asymmetric LSD の方が差動制限トルクが小さく、ヨーレイトが増加していることが分かる。Asymmetric LSD で初期摩擦トルク  $T_0$  と Drive 側のロック率  $\alpha_D$  を小さくしたことによって、2章(i)で述べた、日常域の旋回性向

上を実現できていることを確認した。

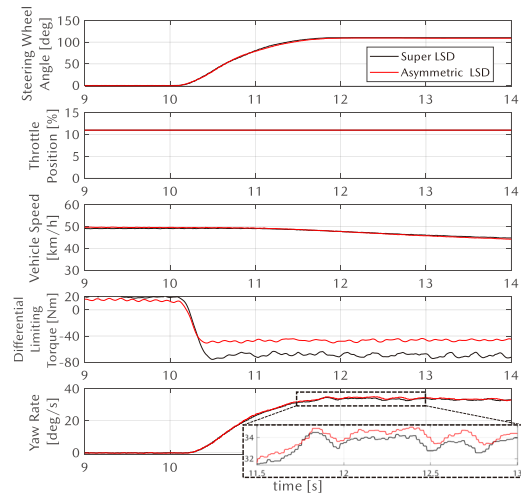


Fig. 8 A Vehicle Time History during Experiment (Steady Turn)

次に、4.1(3)項と同様の走行条件において、実車で走行した時の計測結果を Fig. 9 に示す。Fig. 7 のシミュレーション結果と同様に、Asymmetric LSD の方が差動制限トルクが大きく、ヨーレイトが減少していることが分かる。Asymmetric LSD で Coast 側のロック率  $\alpha_c$  を大きくしたことによって、高速走行でコーナ進入時の減速度が大きいシーンにおいて、2章(ii)で述べた高速走行における減速旋回時の安定性を向上できていることを確認した。

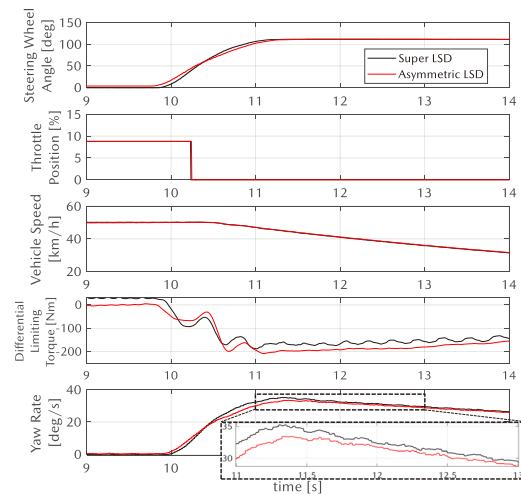


Fig. 9 A Vehicle Time History during Experiment (Deceleration Turn)

以上より、Asymmetric LSD と Super LSD を車両に搭載して比較した結果、4.1節のフルビークルシミュレーション結果と同様に LSD の差動制限特性に応じて車両のヨー運動がねらいどおりに変化することを確認した。

(2) テストコースでの評価

テストコースにて走行評価及び計測を実施した。一例

として、Fig. 10 に評価、計測に使用したコーナ部の模式図を示す。R170 から R60 に変化する左コーナであり、R170 のコーナ進入から R60 のコーナにかけて下り坂となっており、R60 のコーナ脱出以降は登り坂となっている。

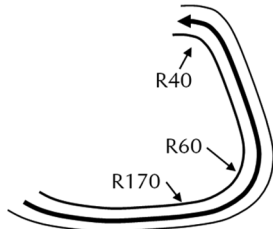
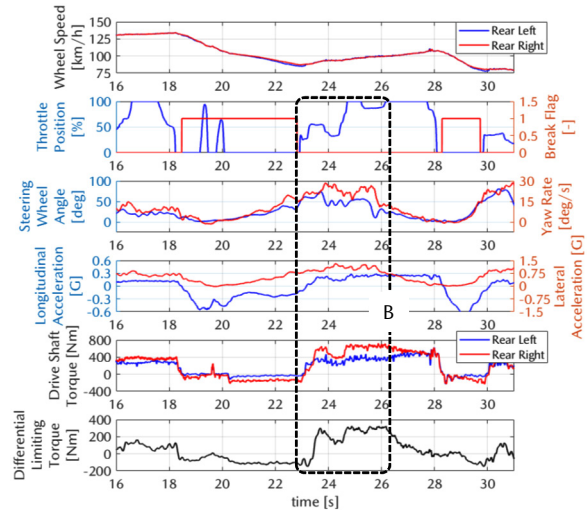
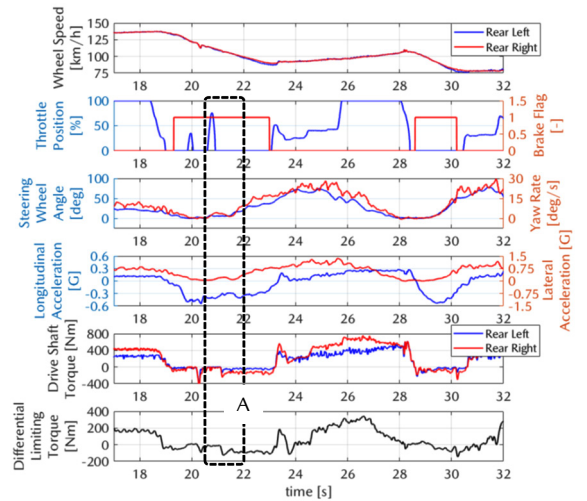


Fig. 10 Schematic Diagram of the Corner

Fig. 11(a)に Super LSD の計測結果を、Fig. 11(b)に Asymmetric LSD の計測結果を示す。車速約 130 [km/h] からブレーキを使用して約 85 [km/h] まで減速しながらギア段を 5 速から 3 速に変速した後、操舵を開始し、その後アクセルを操作して加速しながらコーナを抜けていく一連のコーナリングシーンである。まず、Fig. 11(a)の Super LSD の結果に着目すると、20 [s] 付近から操舵を開始しているが、徐々に操舵量を増やしていく操作となっている。一方で、Fig. 11(b)の Asymmetric LSD は、21 [s] 付近から操舵を開始し、Super LSD よりも操舵初期から操舵角が大きくなっている。これは、減速中に後輪荷重が減少するシーンでも Asymmetric LSD は差動制限力が大きくなる (Fig. 11(b)A) ことで安定性が向上し、ドライバーは操舵初期から舵角を増やしていくことができたためであると考えられる。また、Fig. 11(a)の Super LSD は、23 [s] 付近からコーナ脱出に向けてアクセルを踏み込んで加速していくシーンにおいて、旋回内輪が空転傾向となり、旋回内輪から外輪へ急激にトルクが移動することで、ヨーレイトが急増 (Fig. 11(a)B) し、それに合わせてドライバーがカウンタステアとともにアクセルを抜くことで挙動を抑える操作が見られる。一方で、Fig. 11(b)の Asymmetric LSD は、Super LSD のような旋回内輪から外輪への急激なトルク移動が発生しないため、無駄な修正操作が無く、操舵角も滑らかに切り戻しながらコーナを脱出できていることが分かる。これは、2 章 (iii) で述べたねらいどおり、エンジンが発生可能なトルクに適した差動制限力に設定したことで、トラクション性能を維持しながら、不要なヨー促進モーメントの発生を抑制することで、アクセル操作での車両挙動コントロール性が向上したためであると考えられる。



(a) Super LSD



(b) Asymmetric LSD

Fig. 11 A Vehicle Time History during Winding Road

(3) 一般道での評価

- 国内外において、一般ドライバーを含む多数のドライバーにより、Asymmetric LSD と Super LSD を比較する官能評価を行った。その結果、得られたコメントを以下に記す。2 章で述べた開発コンセプトのとおり、LSD の差動制限特性を適切に設定することで、日常域から高速域まで軽快感と安定性を両立できていることを確認した。
- ターンインから定常旋回にかけて、操舵に対してリニアな応答でスムーズなコーナリングができる
  - アクセル OFF でのターンインにおいて、Asymmetric LSD は車両挙動が安定している。特に下り坂のターンイン時は安定感が大幅に向上している
  - 旋回内輪がスリップするシーンでは、急激なヨー挙動の変化がなく、コントロール性が高いため、安定して加速ができる

5. 外乱安定性に関する検討

4 章までは LSD の差動制限によるヨー運動への影響に

ついて述べた。一方で、自動車は走行中、さまざまな外乱の影響を絶えず受けている。また、前後や左右で差動制限機構をもつ車両は、路面の凹凸や横風のような外乱入力に対して、安定性が変化することも知られている<sup>(6)</sup>。そこで本章では、車両に外乱入力が入力された場合にLSDの差動制限特性が車両の安定性及ばす影響について検討する。

### 5.1 路面外乱に対する安定性

路面外乱が大きい路面を走行する場合を想定し、10 [mm]の突起を左後輪1輪のみが乗り越えるシミュレーションを実施した。車速80 [km/h]で直進定常走行中に左後輪に上下変位外乱を加えた場合の結果をFig. 12に示す。左後輪の外乱による上下変位に伴い、左後輪に負の前後力が発生し、差動制限トルクの大きさに応じて右後輪に正の前後力が発生することで、外乱ヨーモーメントが発生する。定常走行時に発生する駆動トルク領域では、Asymmetric LSDの方がSuper LSDに対して差動制限トルクが小さく設定されているから、ヨーレイトのピーク値及び横方向変位Yが小さいことが分かる。Asymmetric LSDは、Super LSDに比べ、初期摩擦トルク $T_0$ とDrive側のロック率 $\alpha_D$ が小さく、アンジュレーションのある路面を走行するようなシーンでも外乱感度が低く、安定性が向上するため、2章(i)で述べた日常域の安定性向上が実現できる。

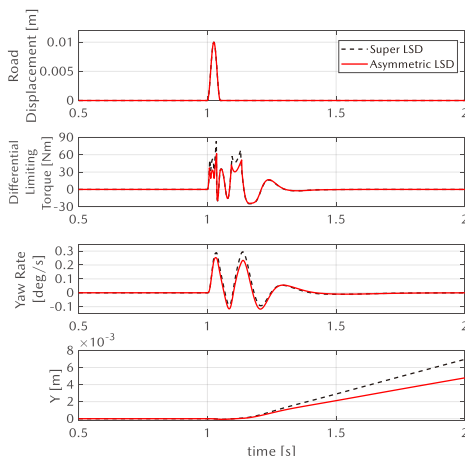


Fig. 12 Effects of Road Surface Disturbance

### 5.2 車体へのヨーモーメント外乱に対する安定性

直進走行中に横風を受けるシーンを想定し、車速80 [km/h]で直進走行中に車体に対して直接反時計回りのヨーモーメント外乱を与えた場合のシミュレーションを実施した。シミュレーション結果をFig. 13に示す。5.1節の路面外乱とは反対に差動制限トルクが小さい方が進行方向に対してヨーレイトのピーク値及び横方向変位Yが大きい。これは、今回のシミュレーション条件のように車体に反時計回りのヨーモーメントが入力された場合、

左車輪速<右車輪速の左右車輪速差が発生する。このとき、LSDの差動制限効果によって、復元方向のヨーモーメントが発生する。差動制限トルクが小さいとヨー復元モーメントも小さくなるため、Asymmetric LSDのヨーレイトピーク値はSuper LSDに比べて大きく、ヨーモーメント外乱への安定性がわずかに低下したと考えられる。

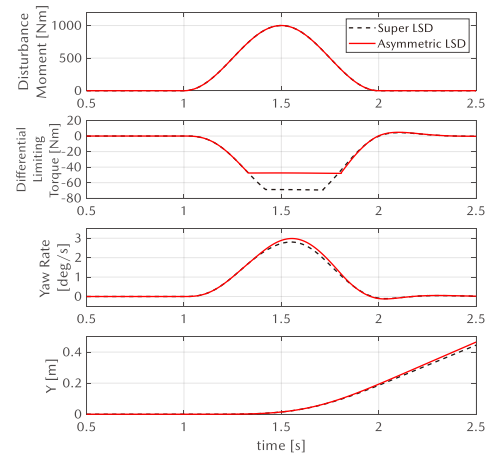


Fig. 13 Effects of Yaw Moments Disturbance

以上より、 $T/2 > -110$  [Nm]の範囲において、Asymmetric LSDはSuper LSDより差動制限力が小さいため、アンジュレーション等による路面外乱に対する安定性は高く、横風外乱のような車体に入力されるヨーモーメント外乱に対する安定性はわずかに低いもののSuper LSDとほぼ同等である。外乱の種類によって、外乱安定性の大小関係が逆転することから、LSD開発時の検討においては、外乱安定性に関する性能バランスを考慮した上で、差動制限特性を設定する必要がある。

## 6. おわりに

本稿では、車両運動におけるLSDの差動制限効果と実車への適用例を示した。ロードスター/ロードスターRFに対して、駆動輪である後輪の接地荷重状態に応じた差動制限特性を設定できるAsymmetric LSDを開発し、差動制限トルクによるヨー復元モーメントを活用した旋回挙動の安定化効果を机上シミュレーション結果及び実車計測で確認した。また、外乱安定性について検討し、受ける外乱や走行シーンによっても安定性の優劣が逆転することから、ダイナミクス性能全体としてねらいの性能バランスを考慮した差動制限特性の設計が必要であることを示した。

## 参考文献

- (1) 國井ほか：四輪駆動力自在制御システム (SH-AWD) の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.2, pp.9-16 (2004)
- (2) 澤瀬ほか：電動乗用車に適した左右輪間トルク差発

- 生装置に関する研究，自動車技術会論文集，Vol.45，  
No.5，pp.823-828 (2014)
- (3) 嶋田ほか：新世代 i-ACTIV AWD の紹介，[マツダ技報](#)，No37，pp.33-38 (2020)
- (4) 山本ほか：前後駆動力配分の旋回特性への影響，自動車技術会論文集，Vol.54，No.5，pp.1031-1037 (2023)
- (5) 芝端ほか：過渡状態における DYC 制御の原理と応用 (第 2 報) —デファレンシャルギヤのフリクシヨントルクの影響とその制御方法—，自動車技術会論文集，Vol.53，No.4，pp.743-750 (2022)
- (6) 美辺ほか：四輪駆動車の操安性について，自動車技術会論文集，Vol.40，No.3，pp.284-289 (1986)
- (7) 関谷ほか：バネ上 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)

## ■ 著 者 ■



山本 航輝



平賀 直樹



高橋 宏治