

特集：MAZDA CX-60

17

## CX-60 クルージング & トラフィック・サポート (CTS) 開発 Cruising & Traffic Support (CTS) Development for CX-60

原田 翔次<sup>\*1</sup> 川原 康弘<sup>\*2</sup> 元谷 章博<sup>\*3</sup>  
Shoji Harada Yasuhiro Kawahara Akihiro Motodani  
福井 聡一郎<sup>\*4</sup> 大岩根 拓馬<sup>\*5</sup>  
Soichiro Fukui Takuma Oiwane

### 要約

マツダは、安全思想「MAZDA PROACTIVE SAFETY」に基づき、先進安全技術「i-ACTIVSENSE」を開発している。CX-60では、「人間中心」の考え方で、走る／曲がる／止まる全ての支援において、「安心で疲れないクルージング&トラフィック・サポート (CTS)」を目指し開発した。CTSは追従走行機能とステアリングアシスト機能で構成されるシステムであり、ステアリングアシスト機能においては、滑らか、かつ安定して車線の中央を走行する「センタートレース性」、及びステアリングアシスト制御中（以下、CTS制御中）にドライバーが操舵介入した際でも、意のままに操作可能な「ドライバー操舵特性」の両立に取り組んだ。センタートレース性は、新たにモデル予測制御技術を採用することにより、滑らか、かつ安定して車線の中央を走行する性能を実現した。ドライバー操舵特性は、ドライバー走行時とCTS制御時のドライバー操舵特性の一致性を高め、CTS制御中でも意のままの操作を実現した。本稿では、CX-60において2つの性能をより高い次元で両立させた。その開発経緯、及び、採用した技術について紹介する。

### Abstract

Based on the Mazda's safety philosophy, "Mazda Proactive Safety", Mazda has been developing the advanced safety technology, "i-Activsense". For the CX-60, aiming at safe and stress-free driving, we have developed Cruising & Traffic Support (CTS) based on the human centric concept, which supports vehicle's running, turning, and stopping. The CTS system comprises a constant speed/ headway control function and a steering assist function. For the steering assist function, we aimed at smooth and stable lane-keeping "center traceability" and "driver's steering characteristic" that allows driver's operation as desired when CTS control.

For the center traceability, smoothness and stability in lane-keeping have been achieved by adopting Model Predictive Control. The "driver's steering characteristic during CTS control" has been also improved by enhancing consistency between driver's steering characteristic during driver driving and CTS control. High compatibility between the center traceability and driver's operability have been realized. This paper introduces the process and technologies adopted in the development that high compatibility between the center traceability and the driver's steering characteristic have been realized.

**Key words:** Safety, Vehicle dynamics, Active safety, Lane-keeping assistance system, Driving support, Vehicle dynamics control, Lane-keeping control

### 1. はじめに

マツダは、危険な状況に陥ってから対処するのではなく、危険自体を回避するという安全思想、「MAZDA

PROACTIVE SAFETY」の考え方にに基づき、さまざまな運転環境で、ドライバーの認知・判断・操作をサポートし、事故のリスクを最小限に抑えるための先進安全技術「i-ACTIVSENSE」を開発している。

\*1~3 電子基盤開発部  
Electronic Platform Development Dept.

\*4,5 電子性能開発部  
Electrical & Electronics Performance Development Dept.

クルージング&トラフィック・サポート (CTS) は、その技術群の1つであり、高速道路や自動車専用道路走行時の運転負担軽減を目的とし、加減速アシスト制御による前走車に対する追従走行機能と、車線に沿った走行、及び前走車の走行軌跡に沿った走行をアシストするステアリングアシスト機能で構成されるシステムである。CTSは2019年MAZDA3<sup>(1)</sup>から市場導入を開始し、CX-30<sup>(2)</sup>、MX-30<sup>(3)</sup>など各車に搭載している。

CX-60では、「安心して疲れないCTS」を目標に掲げ、ステアリングアシスト機能では、「センタートレース性」と、ドライバー走行時と一致性の高い「CTS制御中のドライバー操舵特性」の両立に取り組んだ。本稿では、ステアリングアシスト機能の開発経緯と採用した技術について紹介する。

## 2. CTSの概要

### 2.1 システムの機能

CTSは高速道路や自動車専用道路走行時の運転負担軽減を目的とし、以下の追従走行機能とステアリングアシスト機能で構成される。

#### (1) 追従走行機能

前走車がない、もしくは前走車との車間距離が遠い場合は、ドライバーが設定した車速で定速走行を行う。また、自車より遅い前走車を検出すると、前走車の速度に応じて、パワートレイン及びブレーキによる減速制御を行い前走車との車頭距離を維持する。前走車がいなくなった場合は、設定車速まで加速し、定速走行を行う。

#### (2) ステアリングアシスト機能

システムが車線を検知している場合は、検知した車線に沿った走行をステアリングアシスト制御によってサポートする。システムが車線を検知できない場合は、追従走行している前走車の走行軌跡に沿った走行をアシストする。

### 2.2 システムの構成

車両運動制御に関わる領域のCTSのシステム構成をFig. 1に示す。

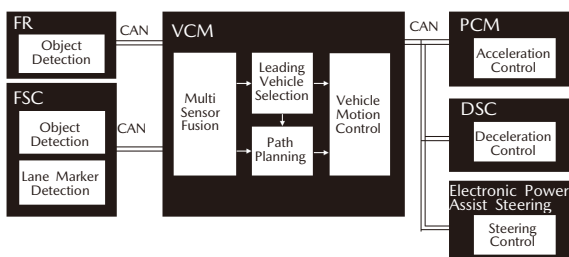


Fig. 1 Summary of CTS System Architecture

周辺環境認識センサーであるフロント・レーダー (FR)、及びフォワード・センシング・カメラ (FSC)、それらのセンサーの情報を統合、前走車や走行軌跡の判断、

加減速やステアリング制御指令値を演算するビークル・コントロール・モジュール (VCM)、駆動力を制御するパワートレイン・コントロール・モジュール (PCM)、制動力を制御するダイナミック・スタビリティ・コントロール (DSC) ユニット、操舵アシストトルクを制御する電動パワーステアリングユニットで構成される。各ユニットはCAN (Controller Area Network) で接続される。

## 3. ステアリングアシスト機能開発のねらい

「人間中心」の考え方で、走る／曲がる／止まる全ての支援において、「安心して疲れないCTS」を目指した。特に、人の感覚に合うように、CTS制御中でも①ベテランドライバーが運転しているような「安心感&快適性」と、②自分の思いどおりにクルマを操作できる「操作性 (自己主体感)」の実現をねらいとした。

### 3.1 センタートレース性

「安心感&快適性」の実現へ向けて、車線中央を精度良く、かつ滑らかな操舵で維持できるCTS制御を目標とした。例えば、Fig. 2のように、カーブを走行するシーンにおいて、青線のようにカーブ外側に膨らみながら走行すると、ドライバー、及び同乗者は車線逸脱のリスクを感じ、安心感が損なわれてしまう。赤線のように高い精度で車線中央を走行すると、車線から逸脱するリスクを最小化し、安心感を最大化することができる。

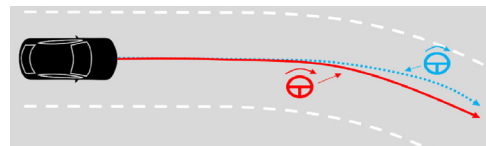


Fig. 2 Center Traceability for Deviation

また、上記の走行軌跡において、カーブ中に舵角の修正が極小となる制御とすることで、滑らかな車両挙動を実現し、乗員の快適性確保を開発のねらいとした (Fig. 3 赤線)。



Fig. 3 Center Traceability for Stability

### 3.2 CTS制御中のドライバー操舵特性

「操作性 (自己主体感)」の実現へ向けて、CTS制御を理解しつつ、ドライバーの意図どおりに車両をコントロール可能なドライバー操舵特性の実現を目指した。

一般に制御の目標追従性を高め、センタートレース性を向上させる場合、自車走行位置と車線中央との偏差に

応じた CTS 制御量が増加する。その背反として CTS 制御中にドライバーが意図して車線中央から離れる際、少しの偏差でも CTS 制御量が大きいいため、それに抗うような過大な操舵感が必要となり、車線中央に近づく際は、CTS 制御が車線中央に戻そうと操舵するため、ドライバーは操舵感を得にくい状態となり、マツダが目指す操舵特性が失われてしまう。

CTS 制御中に隣接車線の車両との距離を確保するために、ドライバー操舵により車線内で隣接車線と反対側に寄って、走行するシーン (Fig. 4) を例に、ねらいとする「CTS 制御中のドライバー操舵特性」について説明する。

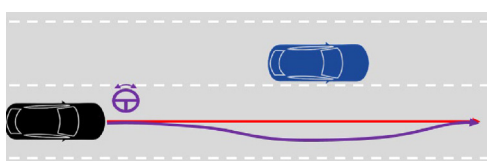


Fig. 4 Assumed Scene of Driver Steering

ドライバー操舵特性は、Fig. 5, 6 のようなドライバーの操舵トルクと操舵角のリサージュ曲線で表現する。Fig. 5 は、CTS 制御を優先し、ドライバー走行時の操舵特性と大きく乖離のある特性を示す。Fig. 6 は、ドライバー走行時と CTS 制御時で一致性の高い操舵特性を示し、マツダは Fig. 6 の特性をねらった。

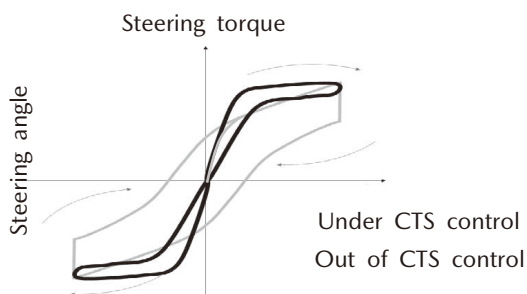


Fig. 5 Steering Characteristic that Prioritizes CTS Control

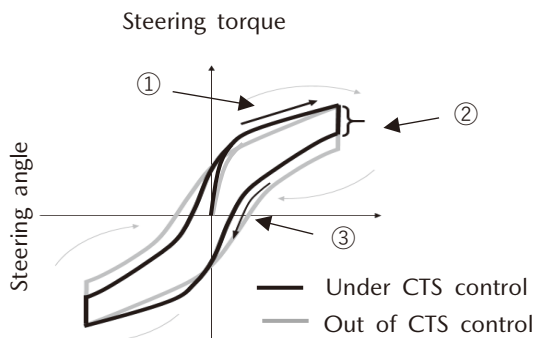


Fig. 6 Target Steering Characteristic

実現に向けて、CTS 非制御時のリサージュ曲線 (グ

レー) を基準に、CTS 制御時のリサージュ曲線の理想形を下記①~③の特性にて定義した。

- ① 操舵の“切り込み”時の中央以降は、舵角の増加量と操舵トルクの増加量が一定比で変化すること。これにより、ドライバー操舵時に、リニアでスムーズな操舵フィールと車両挙動のコントロールを行うことができる。
- ② 操舵の“切り込み”時と“切り戻し”時の操舵トルクに幅を持たせること。これにより、操舵の“切り込み”から“切り戻し”へ変化する際、操舵 (反) 力の急変を抑え、滑らかで一定した操作感を確保することができる。
- ③ “切り戻し”操舵時の中央付近通過時にも所定の操舵トルクを持たせること。これにより、舵角ゼロ点付近でもドライバーに対しステアリングの操舵感を残すことができる。

## 4. センタートレース性の開発

### 4.1 技術課題

開発のねらいであるセンタートレース性を実現するためには、ベテランドライバーの運転と同等の技量を持った CTS 制御を実現する必要がある、以下ポイントを定めた。

- ① ベテランドライバーは通常、刻々と変化する交通環境を先読みし、横加速度が少なく、ふらつきのない走行軌跡を設定し、滑らかな運転を実現している。
- ② ベテランドライバーは「ハンドルにドライバー自身の操舵トルクを伝えてから、自車の走行軌跡が変化するまで」の応答特性を考慮し、最適な操舵量と操舵タイミングを判断することで、不必要な修正操舵を排除し、快適性を向上している。

つまり、CTS 制御において「①周辺交通状況と、②自車の運動特性に応じて最適な制御量を算出する最適操舵制御技術」を開発することが課題である。

### 4.2 技術施策

この課題を達成する施策として、モデル予測制御を採用した。この制御手法を用いて、自車の運動モデルに基づく状態方程式と、自車の挙動に対する評価式を定義することにより、最適な制御指令を算出する。この手法は以下の利点がある。

- ① 将来を先読みした行動予測から、現在の最適な挙動を算出可能である。
- ② 自車の運動モデルを内包することで、自車の運動特性に即した予測が可能である。

自車の運動モデルを Fig. 7, 使用する変数, パラメーターを Table 1 に示す。

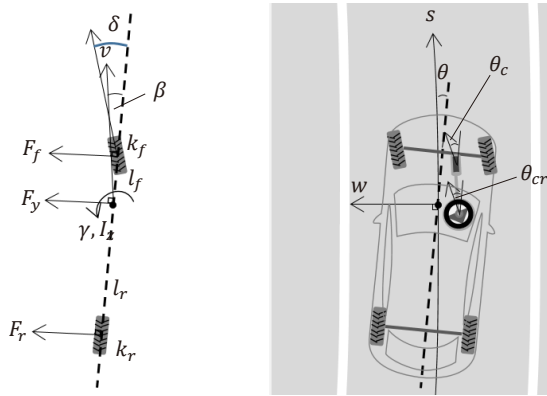


Fig. 7 Vehicle Dynamics Model

Table 1 Definition of Variables and Constants

SYMBOL	DEFINITION	UNIT
$\gamma$	yaw rate	rad/s
$\beta$	slip angle of vehicle	rad
$F_f$	front tire force	N
$F_r$	rear tire force	N
$k_f$	cornering force parameter of front tire	N/rad
$k_r$	cornering force parameter of rear tire	N/rad
$m$	mass of vehicle	kg
$l_f$	distance from gravity to front axis	m
$l_r$	distance from gravity to rear axis	m
$l$	wheel base	m
$l_z$	yaw moment of inertia	kgm <sup>2</sup>
$a$	acceleration	m/s <sup>2</sup>
$v$	velocity	m/s
$s$	longitudinal position on lane	m
$w$	lateral position from center of lane	m
$\delta$	tire angle	rad
$\theta$	orientation from lane	rad
$\theta_c$	steering angle	rad
$\theta_{cr}$	steering angle request	rad
$s_f$	stability factor	—
$\epsilon$	slack factor	—

自車の運動モデルは、平面内の車両運動において、四輪に働くコーナリングフォースが左右輪で等しいと仮定した一般的な等価二輪モデルである。ここで、 $\beta$  は横滑り角を示し、自車の中心軸に対し、進行方向の角度を示す。(反時計回りを正とする。) CTS 制御中は横滑り角  $\beta$  が十分小さいと仮定し、自車横力のつり合い、及びヨーモーメントのつり合いより、式(1)(2)を得る。

$$mv(\dot{\beta} + \gamma) = 2F_f + 2F_r \quad (1)$$

$$l_z \dot{\gamma} = 2l_f F_f - 2l_r F_r \quad (2)$$

更に、定常円旋回を仮定し、式(3)(4)(5)(6)を得る。

$$F_f = -k_f \left( \beta + \frac{\gamma l_f}{v} - \delta \right) \quad (3)$$

$$F_r = -k_r \left( \beta - \frac{\gamma l_r}{v} \right) \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2l_r k_r - ml_f v^2}{2l^2 k_r (1 + s_f v^2)} \delta \quad (5)$$

$$s.t. \quad s_f = \frac{m(k_r l_r - k_f l_f)}{2l^2 k_f k_r} l = l_f + l_r$$

$$\gamma = \frac{v \delta}{l(1 + s_f v^2)} \quad (6)$$

式(5)は、自車の速度  $v$  と前輪の実舵角  $\delta$  より、横滑り角  $\beta$  を算出し、式(6)はヨーレート  $\gamma$  を算出する。これらの式を中心として、前後方向、旋回方向の自車挙動の物理量は微分方程式でモデル化する。同様に、ハンドル角指令値  $\theta_{cr}$  に対する、ハンドル角  $\theta_c$  と前輪の実舵角  $\delta$  の応答は、前輪にかかるセルフアライニングトルク等を考慮して、一次遅れ系とキングピン周りの力のつり合いによりモデル化する。これらの微分方程式の記述は割愛する。モデル予測制御で使用する状態方程式は、これらの微分方程式を離散化する。車両モデルの制御因子  $\mathfrak{u}$ 、状態因子  $\mathfrak{X}$  を式(7)(8)で示し、モデル予測制御にて最適解を算出するための評価関数  $\mathfrak{J}$  を式(9)で示す。

$$\mathfrak{u} = [\dot{a}, \dot{\theta}_{cr}, \epsilon]^T \quad (7)$$

$$\mathfrak{X} = [v, a, \theta_c, s, w, \theta, \theta_{cr}, \delta]^T \quad (8)$$

$$\mathfrak{J} = W_N (\mathfrak{X}_N - \mathfrak{X}_{refN})^2 + \sum_{i=0}^{N-1} \{ W_{xi} (\mathfrak{X}_i - \mathfrak{X}_{refi})^2 + W_{ui} (\mathfrak{u}_i - \mathfrak{u}_{refi})^2 \} \quad (9)$$

ここで  $N$  はモデル予測制御のホライズンを離散時間で分割した時のステップ数であり、 $W$  は重み、 $ref$  は目標値を示す。第一項は終端での状態因子の評価項であり、 $\mathfrak{X}_{refN}$  は終端状態因子の目標を示す。同様に第二項は、終端以外の評価項である。

重み  $W$  は因子ごとに設定し、特に横移動に関連する 4 因子 (ハンドル角指令値の微分値  $\dot{\theta}_{cr}$ 、前輪の実舵角  $\delta$ 、車線横位置  $w$ 、車線と自車の角度  $\theta$  をバランスよく重みづけすることで、快適性とセンタートレース性を両立した。

### 4.3 結果

自車が直線から旋回 R の小さい右カーブに進入するシーンにおける従来制御手法との比較結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 からカーブ進入区間において、従来の制御手法では操舵タイミングが遅れ、車線中央から左側に膨らむ傾向にあった。CX-60 では、より車線中央に近い位置を走行していることがわかる。

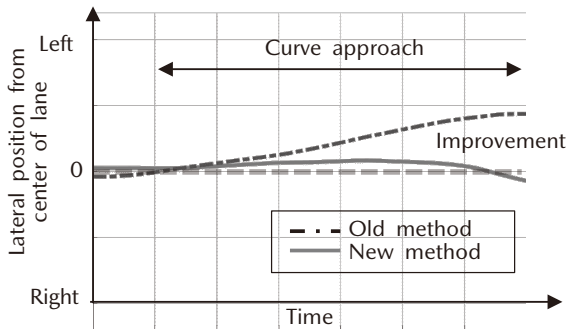


Fig. 8 Comparison of Center Traceability for Deviation

次に、自車がカーブ旋回中のシーンにおける比較結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 から従来比、ヨーレートの変化率の振幅や変化回数が減少しており、自車の車両挙動が滑らかで、かつ安定していることがわかる。

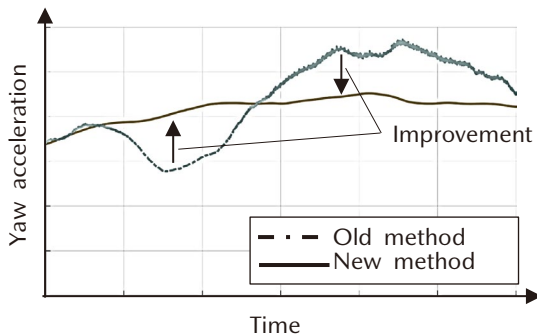


Fig. 9 Comparison of Center Traceability for Stability

### 5. CTS 制御中のドライバー操舵特性の開発

開発のねらいである高い「操作性（自己主体感）」の実現に向けた CTS 制御中のドライバー操舵特性開発における主な取り組みを紹介する。本開発では 3.2 節に記載した Fig. 4 のシーンにおいて、ドライバー切り込み操舵、及び切り戻し操舵に状態を分割し、それぞれの状態における制御を検討した。以下では、ドライバー切り込み操舵時、及び切り戻し操舵時の制御開発についてそれぞれ紹介する。

#### 5.1 ドライバー切り込み操舵時の制御

ドライバー切り込み操舵時の特性のねらいは 3.2 節に記載した Fig. 6 の①のリニアな操舵特性である。ねらいの特性を実現する案として、ドライバー操舵トルクを検出し、そのトルク量に応じて CTS 制御量を減少させる制御が考えられる。この制御では、操舵トルクに応じた CTS 制御量の調整により、リニアな操舵特性を得られやすい。一方で、例えば、ステアリングを片手で把持するなどドライバーの操舵意図はないが、手や腕の自重等で操舵トルクが入力された場合、意図せず CTS 制御量が減少することで、センタートレース性が低下する（ドライ

バーの車線中央を維持走行してほしい期待値から外れる)。これを抑制するため、比較的大きな操舵トルクが入力されるまで CTS 制御量を維持すると、ドライバーが何かを避けようと意図して操舵する場合に、CTS 制御に抗うような操舵フィールとなってしまふ。

そこで、ドライバーの意図のある操舵と、意図のない操舵特性の違いの解明に取り組んだ。まず、意図のある操舵と、意図のない操舵を定義した。その一部を Table 2, 3 に示す。

そして、車両テストで各操舵パターンにおける操舵トルク特性をデータ計測した。結果、Fig. 10 のようなデータが得られた。本データより、操舵トルク情報のみを見ると同じ操舵トルク量でも意図のある操舵と意図のない操舵が混在し、これらを切り分けできないことがわかる。そこで、操舵トルク変化率の情報を加えることで、Fig. 10 のように意図のある操舵と意図のない操舵を切り分けることが可能と判断した。

Table 2 Intentional Steering

No.	Assumed scene	Image diagram
1	Avoid obstacles (falling objects etc.) on the road.	
2	Avoid continuous obstacles (pylon etc.) on the road	
3	Change lane to the next lane.	

Table 3 Unintentional Steering

No.	Assumed scene	Image diagram
1	Driver's hand hits the handle.	
2	Shake the handle to check steering assist control.	
3	Put the handle with one hand.	

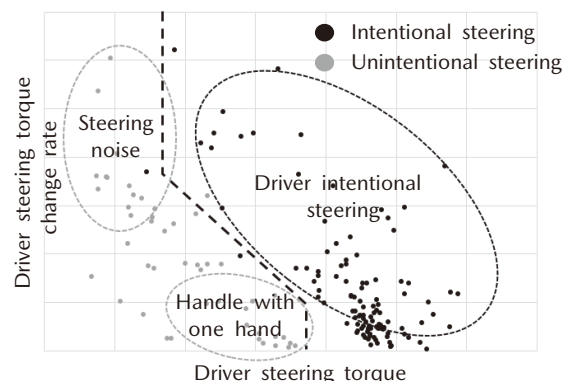


Fig. 10 Test Results of Intentional/Unintentional

上記より、Fig. 11 のように操舵トルクと操舵トルク変化率情報を用いて CTS 制御量を減少させる制御を開発した。そして、操舵トルク変化率を用いた CTS 制御減少量の調整により、ドライバーの意図、無意図の操舵を切り分け、しっかりセンタートレースしつつ、ドライバーが意図する操舵の場合にドライバーの意図どおりに操舵可能な性能を達成できた。

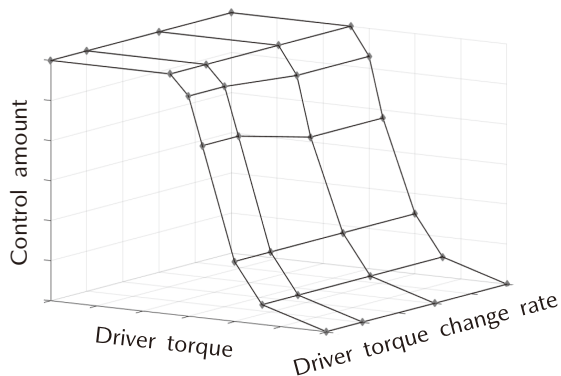


Fig. 11 Steering Assist Reduction Control with Steering Torque Change Rate

## 5.2 ドライバー切り戻し操舵時の制御

ドライバー切り戻し操舵時のシステムとドライバーの操舵親和性のねらいは 3.2 節に記載した Fig. 6 の②及び③である。②の切り戻し時の幅を持たせるため、切り込み時に減少させた CTS 制御量をドライバー操舵トルクに応じてすぐに復帰させず、復帰速度をコントロールする制御を開発した (Fig. 12)。また、③のステアリングの操作感を持たせるため、車線中央を外れようとする操舵であるか、車線中央に戻ろうとする操舵かによって、CTS 制御量をコントロール可能な制御を開発した。この 2 つの制御により、ドライバーが車線中央に戻るための切り戻し操舵時に、余計なアシストをしてしまい、ドライバーの思った以上に操舵され、無駄なアシストに感じる「引っぱられ感」や、車線中央に戻ろうとするが CTS 制御に抗って操舵しなければならない「抵抗感」のバランスがとれるようになった。

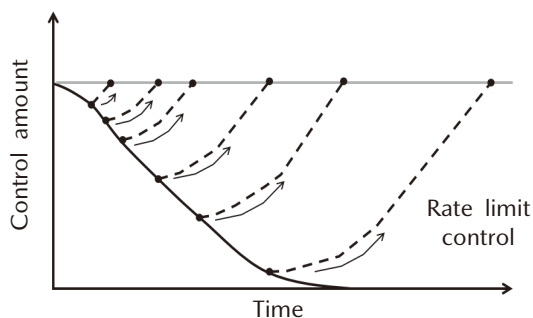


Fig. 12 Steering Assist Return Speed Control

## 5.3 結果

CX-60 の実車テスト結果を Fig. 13 に示す。ドライバー走行時のドライバー操舵特性と、CTS 制御時のドライバー操舵特性が近い特性を示すことがわかる。つまり、ねらいである 3 つのポイントを実現できており、「操作性 (自己主体感)」のある CTS を開発できたと考える。

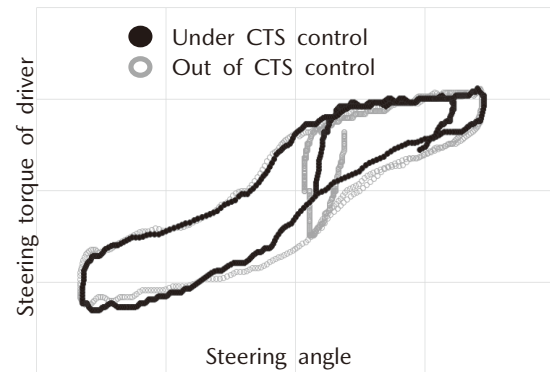


Fig. 13 Test Result of Steering Characteristics Under/Out of CTS Control

## 6. おわりに

CX-60 では「人間中心」の考え方にに基づき、CTS の「安心感 & 快適性」、及び「操作性 (自己主体感)」の向上に取り組んだ開発経緯と、採用技術を紹介した。2 章では CTS の概要、3 章ではステアリングアシスト機能のねらいを説明し、4 章ではセンタートレース性の開発、5 章では、システム制御中のドライバー操舵特性の開発経緯、採用技術について述べた。

## 参考文献

- (1) 別府ほか：新型 MAZDA3 の紹介、[マツダ技報, No.36, pp.3-10 \(2019\)](#)
- (2) 佐賀ほか：MAZDA CX-30 の紹介、[マツダ技報, No.37, pp.3-6 \(2020\)](#)
- (3) 竹内ほか：MX-30 の紹介、[マツダ技報, No.38, pp.9-12 \(2021\)](#)

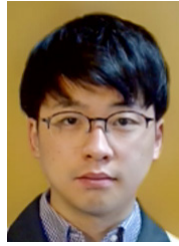
■著者■



原田 翔次



川原 康弘



元谷 章博



福井 聡一郎



大岩根 拓馬