

# トルクベクトリングデファレンシャル制御用ECUの開発

## Development of Torque Vectoring Differential control ECU

|      |                    |
|------|--------------------|
| 土田克実 | Katsumi TSUCHIDA   |
| 長本真  | Makoto NAGAMOTO    |
| 竹丸伸治 | Shinji TAKEMARU    |
| 久永将人 | Masato HISANAGA    |
| 黒川亮介 | Ryosuke KUROKAWA   |
| 篠原貴文 | Takafumi SHINOHARA |



### 要旨

LEXUSはレクサスブランドを牽引するスポーツイメージの確立のため、2007年にIS F、2010年にLFAを世の中に送り出してきた。さらなるブランド力向上、認知度アップのため、「走りを楽しみたい全てのドライバーが笑顔になれるスポーツカー」をコンセプトとする、新たなFモデルLEXUS RC Fを開発、販売を開始した。高次元の車両旋回性能を実現するため、後輪の駆動力を電子制御により左右にアクティブに「移動」させることができるTVD (Torque Vectoring Differential) を開発し、FR車両として世界初採用した。(TVDはトヨタ自動車株式会社としても初採用) 中高速域での軽快な操舵感と安定感を両立し、FR車として理想の車両挙動の実現に貢献している。当社は、この左右駆動力分配を行うトルクベクトリングモジュールを制御するECU (TVD ECU) を開発している。本稿ではその概要、ECU構成とその特徴、アクチュエータ制御内容について紹介する。

### Abstract

LEXUS released IS F in 2007 and LFA in 2010 to establish a sporty image leading the LEXUS brand. To further improve the brand power and the recognition of LEXUS, LEXUS started selling a new F model: LEXUS RC F, developed with the concept of 'sport car to be enjoyed by all enthusiasts - no matter what their level of expertise.' To provide excellent turning performance, LEXUS engineers developed and adopted Torque Vectoring Differential (TVD) technology for a front-engine rear-wheel-drive (FR) vehicle for the first time in the world (first TVD for Toyota Motor Corporation) that performs electronic control to actively 'transfer' torque to right and left rear wheels. The TVD technology contributes to the implementation of ideal vehicle behavior for an FR vehicle, achieving both of a light steering feeling and a stable feeling during middle/high speed traveling. FUJITSU TEN developed the ECU (TVD ECU) that controls a torque vectoring module for right/left torque distribution. This paper introduces the outline, configuration and features of the TVD ECU and its actuator control method.

1

はじめに

一般的な自動車には駆動輪にデファレンシャルギア（デフ）が搭載されており、旋回時の内外輪速度差を吸収しスムーズな旋回を実現している。しかしその反面、車輪に負荷がかかっていないと空転してしまうという欠点も持ち合わせている。脱輪時や、オフロードなどでのスタック、高速旋回時の内輪荷重抜けによるトラクション低下現象がこれにあたる。この現象に対し、デフロックや、リミテッド・スリップ・デフ（LSD）といった差動制限によりトラクションを確保するシステムが製品化されている。これらは特定条件下においてのみ作動するシステムであるが、本稿で紹介するTVD（Torque Vectoring Differential）は、左右駆動輪に発生するトルクを電子制御によりアクティブに変化（移動）させ、左右車輪速差による車両のヨーモーメントを強制的に発生させることで旋回性能を向上させるシステムである。市販車として古くは90年代後半から登場しており、各社採用状況の年表を図1に示す。

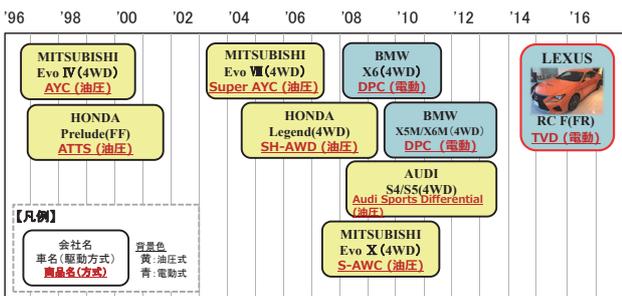


図1 各社のTVD採用の状況  
Fig.1 Adoption of TVD by automakers

近年、各社のTVD採用が進んでおり、市場として旋回性能に力を入れていること、車両重量が重くアンダーステア傾向の強い4輪駆動車に採用していることがわかる。また、機構には油圧式を採用しているものが多い。

今回RC Fに採用されたTVDは、FR車として世界初（TVDはトヨタ自動車株式会社として初）であり、機構に3相ブラシレスモータを用いた電動式である。他社が多く採用している油圧式に比べ高応答であり、作動温度範囲が広く、高精度な制御が可能という点が優れている。

本稿ではシステム概要、ECU構成、アクチュエータ制御について述べる。

2

システム概要

2.1 システム構成

本システムの構成を図2に示す。通常のデフの左右にトルク移動モジュールを追加したTVD FDU（Final Drive Unit）と、各種車両情報（車速、舵角等）からトルク移動量を演算し、FDUに搭載されている3相ブラシレスモータ

を制御するTVD ECU、TVDの制御モードを切り替えるTVDモードセレクトスイッチ、TVDの制御モードや後輪駆動力、TVDのトルク移動量を表示する専用メータから構成されている。

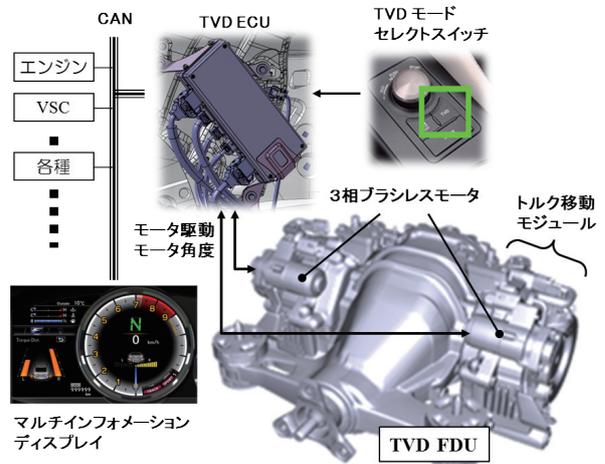


図2 システム構成

Fig.2 System configuration

2.2 駆動力移動（トルクベクトリング）方法

エンジントルクはプロペラシャフトを用いてリアデフへ伝達され、デフを介し、左右のドライブシャフト（左右輪）にトルクが振り分けられる。直進時は左右輪のトルクは均等に分配されている。TVD FDUのトルク移動モジュールには多板クラッチが内蔵されており、クラッチを押し付けた側の車輪トルクが増加する機構となっている。図3のように、左側クラッチを動作させ左輪のトルクを増加させると、左右輪のトルク総和は不変のため、右輪のトルクは減少する。つまり、「右輪の駆動力を左輪に移動させた」ことであり、これがトルクベクトリングである。トルク移動量はクラッチ押し付け量に比例しており、クラッチは各種ギアを介してモータにつながっているため、モータ角度（クラッチ押し付け量）を制御することによりトルク移動量のリニアな制御を実現している。

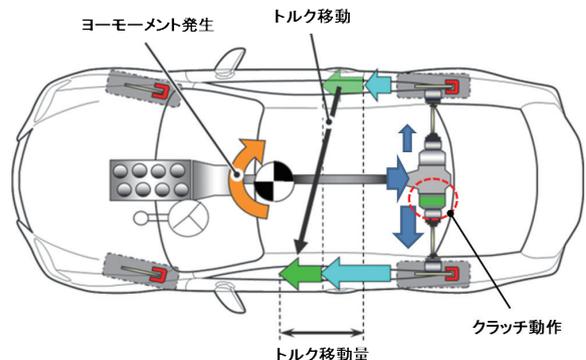


図3 トルク移動とヨーモーメントの発生

Fig.3 Torque transfer and yaw moment generation

3

TVD ECUの構成

3.1 ECU開発コンセプト

本製品は開発開始から量産まで約2年（開発期間約1.5年）という新規製品としては異例の短期開発であった。そのため、制御ロジック、ハードウェア、ソフトウェアの各要素の開発に慎重かつ迅速な対応が求められた。本項では、その取り組みについて説明する。

TVD ECUの機能は、ドライバーの操作情報や車両状態情報から目標とするトルク移動量を演算し、FDUの左右に搭載されている3相ブラシレスモータ（2個）を制御することである。設計から評価のサイクルを繰り返す通常の開発期間が確保できないため、従来の設計資産を有効活用することで開発期間の短縮、品質確保を行うことを主眼としたECUコンセプトを採用した。

車両情報に基づき左右の目標モータ角度算出までを行うメインマイコンと、左右それぞれのモータ制御を行うサブマイコン2個の3マイコン構成とした。これはHV / MG（Motor/Generator）ECUのチップセットをベースとし、TVD専用部分をチューニングした。また、モータ制御回路部はEPS ECUの設計資産を踏襲しつつ、TVD向けとして新規回路を採用した。EPSのような流動数の多い製品はチップセットがカスタムIC化されており、そのまま活用することが不適切であったためである。TVD ECUの構成を図4に示す。

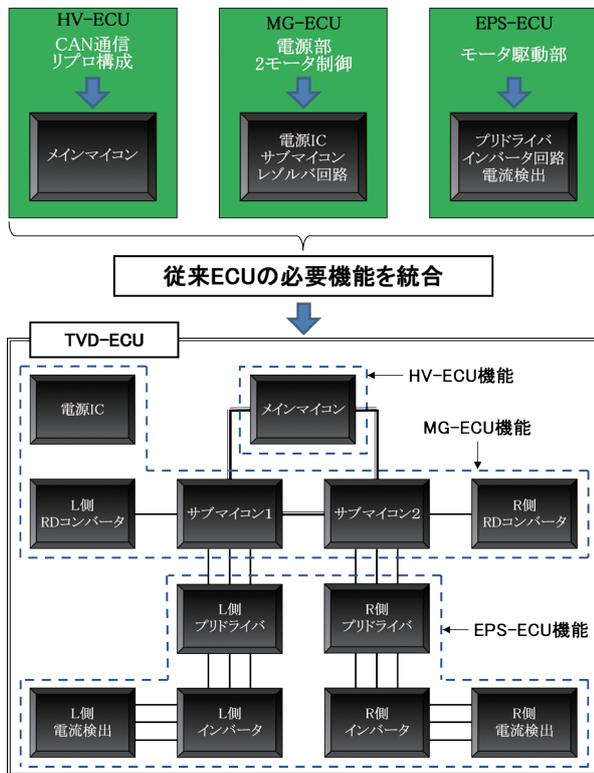


図4 TVD ECUの構成図

Fig.4 TVD ECU configuration

3.2 ハードウェアの開発

開発コンセプトに基づき、製品化するにあたり、課題となった3項目とその対応について説明する。

(1) 部品実装面積の不足

コスト、設計の効率性を考慮すると基板は1枚構成が理想であるが、既存製品の設計資産を活用する必要があったため汎用部品の部品点数が多くなったことと、限られた搭載スペース内にECUサイズを納める必要があったため、基板1枚構成では実装面積の確保が困難であった。そのため図5に示すように、マイコン、電源IC、レゾルバなどの制御部（制御基板）とプリドライバ、インバータ、電流検出などのモータ駆動部（パワー基板）で分離する2枚基板構成とした。モータ駆動部を分離したのは、エミッションノイズ対策のためでもある。

(2) 放熱設計とECU構造

モータ駆動時に通電する大電流によりインバータ部の素子（パワー MOS-FET）が発熱するため、発熱量の把握と放熱方法が構造設計に要求される。TVDは新規システムのため、開発初期段階では発熱量の見極めが難しく、開発過程で発熱量が想定よりも増加するリスクが考えられた。そのため、放熱性能のマーヅンを確保できるよう、EPS ECUで実績のあった発熱素子を筐体（ヒートシンク）へ直接放熱させる構造とすることで十分な放熱性能を確保し、リスクへの備えとした。構造図を図5に示す。

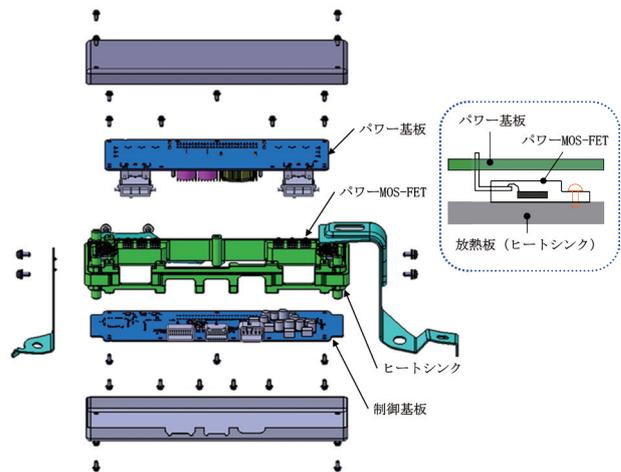


図5 TVD ECUの構造図

Fig.5 TVD ECU structure

(3) エミッションノイズ

ECUから放射されるノイズが車両のラジオに雑音として影響してしまうため、そのノイズレベルを規定値以下に抑える必要がある。TVDのモータ通電はPWM制御を用いており、モータ駆動用電源ラインと、モータラインにはパワーMOS-FETを駆動することによるスイッチングノイズが発生するため、開発初期段階から金属筐体の採用、モータハーネスとコネクタのシールド化等の対策を織り込んでいた

が、初期の実験車両評価では規格を満足することはできなかった。部品配置の見直しや電源入力部のLCフィルタ定数の最適化、スイッチングノイズ抑制部品のチューニング等の対策を行うことでノイズレベルを低減し、規格を満足することができた。対策前後のノイズレベル比較を図6に示す。

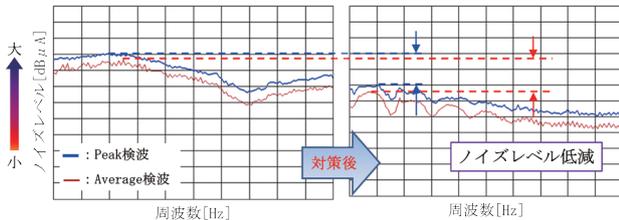


図6 対策前後のノイズレベル比較

Fig.6 Comparison of noise levels before and after improvement

### 3.3 ソフトウェアの開発

短期間でのECU開発に対応するため、ソフトウェア開発においても量産実績のあるソフトウェア資産を多く活用した。メインマイコンはEFI ECUのソフトウェアプラットフォーム資産を活用、サブマイコンはMG ECUのソフトウェア資産を活用した。以下にその構成を紹介する。

#### (1) メインマイコン

メインマイコンのソフトウェア構成を図7に示す。

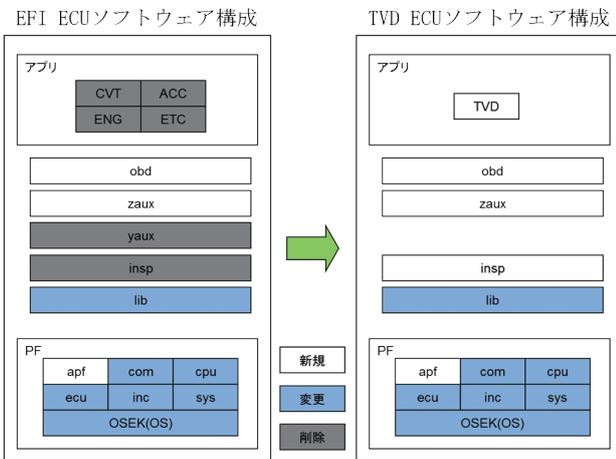


図7 メインマイコンのソフトウェア構成

Fig.7 Software configuration on main microcomputer

メインマイコン内の車両運動制御アプリケーション (TVDアプリ) の仕様開発では、MATLAB/Simulinkを用いた制御モデルを活用しており、制御モデルから自動生成したコードをECUに実装して実車評価が行えるよう、浮動小数点演算の実行が可能マイコンを採用した。モデルを活用して短期間で制御仕様の作り込みを行った後、ハンドコードでソフトウェアを再構築、演算の固定小数点化や例外処理、エラー処理の作り込みを実施した。ハンドコードでソフトウェアの再構築を行う事により、機能開発に主

眼を置いたモデルベース開発では抽出しきれない例外的なソフトウェアの振る舞いについても問題点を洗い出すことができ、ソフトウェアの品質向上ができた。

#### (2) サブマイコン

サブマイコンのソフトウェア構成を図8に示す。

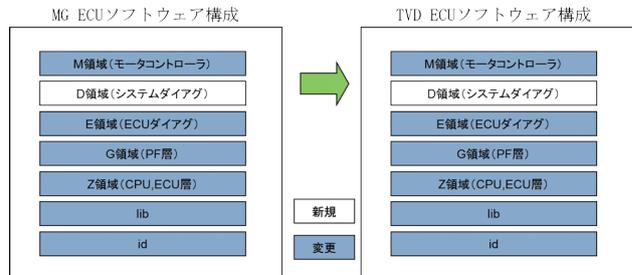


図8 サブマイコンのソフトウェア構成

Fig.8 Software configuration on sub microcomputer

サブマイコンは、TVD ECUと同様にブラシレスモータを駆動するMG ECUのソフトウェア資産を活用した。ソフトウェア構成は同じとして、TVDに特化した部分に変更を施した。MG ECUのモータ制御は「トルク制御」であるが、TVDは「位置 (角度)」を制御する必要があるため、位置制御仕様を新規開発しソフトウェアへ反映した。

## 4 TVDアクチュエータ制御

### 4.1 TVDアクチュエータの特徴

TVD ECUは、モータ角度によりトルク移動量を制御しており、トルク移動モジュールの機械的構造を考慮したアクチュエータ制御を行う必要がある。図9にトルク移動モジュール構造図と、モータ積算角度とモータ電流値の関係を示す。

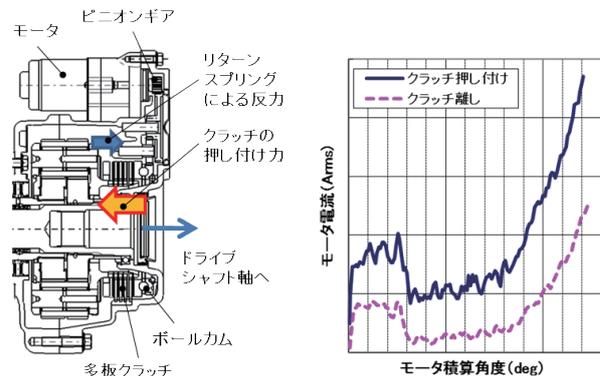


図9 トルク移動モジュールの構造と動作電流

Fig.9 Structure of torque transfer module and its operation current

モータの回転は各種ギアを経由し、ボールカムで軸方向の力に変換され、クラッチを押しつける。クラッチは角度原点方向に戻すためのリターンスプリングにより押し返されており、このばね反力がモータの負荷となるため、モー

タ角度を大きくするためには多くのトルク出力（電流）が必要となる。つまり、角度に比例してモータへの負荷が増加する機構となっている。

また、クラッチ摩擦による温度上昇と摩耗を防ぐため、クラッチ周辺のモジュール内部はオイルで満たされており、温度環境の変化によるオイル粘度（フリクション）の変化も負荷変動の要因となる。さらに、部品バラツキや、バッテリー電圧変動等、様々な誤差要因が存在する。

アクチュエータ制御はこのような環境変動に対するロバスト性の確保が必要である。

### 4.2 角度フィードバック制御

開発当初の制御ブロック図を図10に示す。EPSやMGで実績のある、トルク（電流）フィードバックの外側に角度フィードバックのループ（PID制御）と、角度に対して負荷が増加することの対応としてフィードフォワード項（角度に対して電流指令を増減させるMAP）を追加した制御系を構築した。制御結果を図11に示す。

本アクチュエータはイナーシャ（慣性モーメント）成分が大きいこと、リターンスプリングのばね反力が角度により変化するため、PIDゲインパラメータの適合でオーバーシュートを抑制することが困難であった。また、PIDゲイン適合は常用域である常温で行っていたが、低温環境ではフリクション増加が非常に大きく、応答性が著しく低下してしまった。結果として角度フィードバック制御では、負荷変動が大きい本アクチュエータのロバスト性を確保することができなかった。

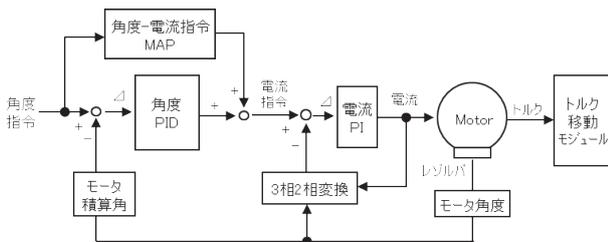


図10 制御ブロック図（角度F/B + 角度F/F）  
Fig.10 Control block diagram (angle F/B + angle F/F)

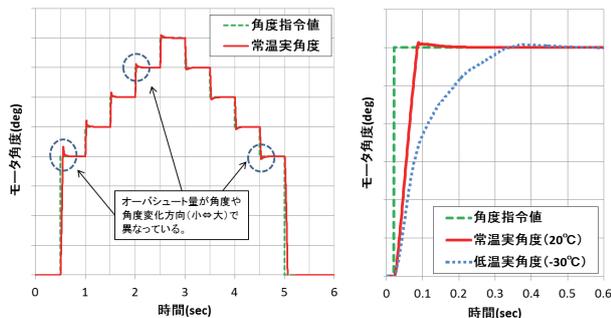


図11 角度F/B制御の応答性とオーバーシュート量  
Fig.11 Responsiveness to angle F/B control and overshoot amount

### 4.3 速度フィードバック制御

角度フィードバックでは角度偏差に対して出力算出を行うため、負荷条件が異なる場合でも出力は一定となる。そのため負荷変動の影響を直接的に受けってしまう制御系となっていた。目標とする制御は、負荷変動時でも角度変化が一様となる制御である。そこで、角度変化（速度）に対して制御を行う、速度フィードバック制御（PI制御）を導入した。制御ブロック図を図12に示す。

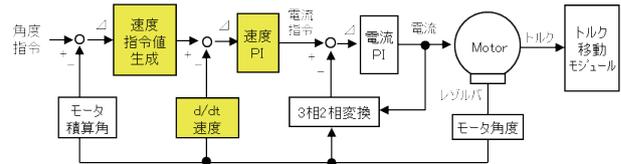


図12 制御ブロック図（速度F/B）  
Fig.12 Control block diagram (velocity F/B)

新しい制御では、角度偏差から速度指令値を算出し、その速度指令値に対してフィードバックを行う構成とした。角度偏差が大きい領域では速度を上げて応答性を確保し、角度偏差が小さくなるに従い速度を下げることで、オーバーシュートを抑制することを狙っている。課題であった低温時の応答性低下に対しては、モータ電流をモータ定格の7割から9割まで増加させることによるモータトルクの確保と、速度フィードバック制御との組み合わせにて改善を試みた。

本制御の制御結果を図13に示す。角度偏差が小さくなるに従い、角度変化が緩やか、すなわち速度低下し、オーバーシュートなく目標値に収束している。また、常温と低温を比較すると、角度変化はほぼ同じ軌跡を描いているが、低温時のフリクション増によるモータ負荷増加に対し、モータ電流を増やすことでトルクを確保していることが読み取れる。

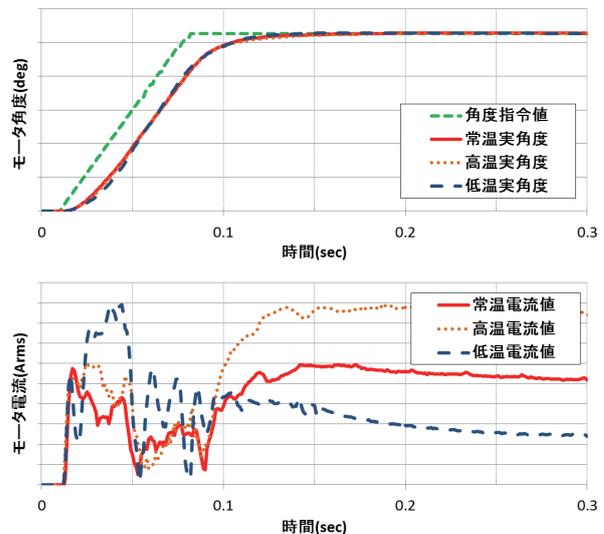


図13 環境温度に対する速度F/Bの制御性とモータ電流  
Fig.13 Controllability of velocity F/B control and motor current in various environmental temperatures

本結果から、速度フィードバックが負荷変動の影響を吸収し、負荷変動時でも角度変化が一樣な動作を実現できており、負荷変動要因（温度、電圧、部品バラツキ）に対し、ロバスト性を確保することができたといえる。

最後に、本制御を反映した評価車両でサーキット走行を行った際のアクチュエータ制御結果を図14に示す。車両状況に応じた複雑な角度指令に対し、モータ角度は確実に、なめらかに追従している。評価ドライバーからも「TVDが制御を感じさせない自然な車両挙動である」とコメントされており、本アクチュエータ制御がTVDの制御要件を満たしていることが確認できた。

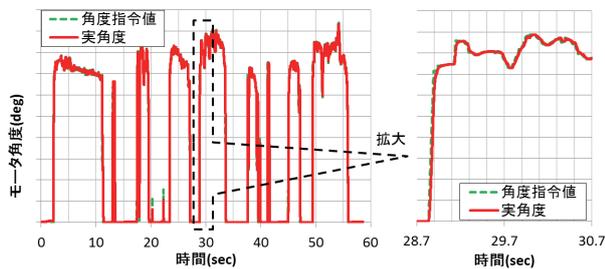


図14 サーキット走行時のアクチュエータ制御結果  
Fig.14 Result of actuator control in circuit traveling

## 5

## おわりに

今回開発したTVD ECUは、当社初のデフ制御ECUとして、2014年9月より量産開始した。

開発期間1.5年という短い時間の中で、サーキット評価や北海道・士別での低温車両評価など、従来のECU業務の枠を超えた範囲まで経験することができたことは設計者として非常に有意義な時間であったと感じている。

今回の超短期開発に対応することができたのは、関係者の努力と、当社の先輩方とトヨタ自動車積み上げてきた設計資産の品質の高さにあると考える。今回開発したTVD ECUの設計資産も次の製品への資産として有効活用していく。

最後にこの開発に協力いただいた社内外の関係者の皆様に心より感謝の意を表します。

## 参考文献

湯浅亮平: LEXUS RC F 用トルクベクトリングデファレンシャルの開発, 自動車技術会シンポジウム2014年11月11日, [2014]

## 社外執筆者紹介



土田 克実  
(つちだ かつみ)

トヨタ自動車(株)  
制御電子システム開発部  
第24電子開発室  
主幹



長本 真  
(ながもと まこと)

トヨタ自動車(株)  
電子プラットフォーム開発部  
主幹

## 筆者紹介



竹丸 伸治  
(たけまる しんじ)

AE技術本部パワエレ技術部



久永 将人  
(ひさなが まさと)

AE技術本部ソフト技術部



黒川 亮介  
(くろかわ りょうすけ)

AE技術本部パワエレ技術部



篠原 貴文  
(しのはら たかふみ)

AE技術本部パワエレ技術部  
チームリーダー