

---

# Adaptive MFCによる電気自動車のアンチスリップ制御

## Traction Control System Based on Adaptive Model Following Control for Electric Vehicles

加藤 正浩, 殷 徳軍 (慶應義塾大学)

Masahiro Kato, Dejun Yin (Keio Univ.)

---

**要旨** インホイールモータを搭載した電気自動車の走行性能を向上させるため、路面状態に適応したトラクション制御システムを開発した。走行中のスリップ率と路面摩擦係数を推定し、それらの値より、制御システムのフィードバックゲインと時定数を適応的に生成する。シミュレーションと走行実験を行い、通常の路面状態では高い加速性能を持ち、滑りやすい路面状態ではタイヤのスリップを抑制することを確認した。加えて、この制御をプローブカーシステムへの適用について考察を行った。

**Summary** In order to improve the driving performance of electric vehicles with in-wheel motors, we developed a traction control system that adapts to road conditions. The feedback gain and the time constant of the control system are adaptively generated by the estimated slip ratio and friction coefficient during driving. The simulation and the experimental results show that the control system achieves high acceleration performance in normal road conditions and restrains wheel slip on slippery roads. In addition, we discussed the possibility of applying the traction control method to a probe car system.

キーワード：電気自動車, トラクション制御, アンチスリップ制御, モデル追従制御

---

### 1. はじめに

環境問題やエネルギー問題の観点で優位性を持つ電気自動車は、各方面での研究開発が進められ、昨今では一般ユーザが購入可能な価格のものが発売されるに至っている。従来、一充電航続距離が内燃機関自動車に対して劣ることが課題とされていたが、動力伝達効率の向上が可能なインホイールモータの採用により、実用上問題にならない程の航続距離を確保した電気自動車も提案されている<sup>(1)</sup>。

いろいろな形式があるインホイールモータの中でも、モータ回転子とタイヤホイールが直に接続されるダイレクトドライブ方式は、電力消費を少なくできることの他に、モータのトルク応答の速応性と線形性を活用できるという利点を持っている。そのため、この利点を活かしたインホイールモータ型電気自動車のトラクション制御の研究が進められている。

トラクション制御の一手法として、モデル追従制御 (Model Following Control : MFC) を用いて走行安全性を向上させるアンチスリップ制御が報告されている<sup>(2)(3)</sup>。この手法は、スリップを生じていない車両状態モデル

に追従するようにモータトルクを制御し、滑りやすい路面でもスリップの増大を抑制するものである。

筆者は、MFCの発展として、路面状態と走行状態に適応したトラクション制御法である適応型モデル追従制御 (Adaptive MFC) を開発した<sup>(4)(5)</sup>。本論文では、シミュレーションによって本制御の効果を示し、実際のEV車両に適用して滑りやすい路面でのアンチスリップ制御の検証実験の結果を報告する。また、その制御法をプローブカーシステムに活用した場合の有効性についても論ずる。

### 2. モデル追従制御(MFC)によるアンチスリップ制御

#### 2.1 MFCの概要

車両が並進走行する際の運動モデルは図1のように表すことができ、運動方程式は(1)~(4)式で与えられる<sup>(2)(3)</sup>。また、タイヤと路面間の摩擦係数 $\mu$ とスリップ率 $\lambda$ の間には、図2に示すような関係があることが知られている。本稿では、この特性を表現するために(5)式で示すMagic Formula<sup>(6)</sup>を使用した。

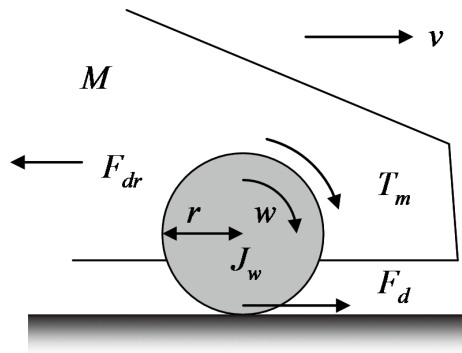


図1 車両の並進運動モデル

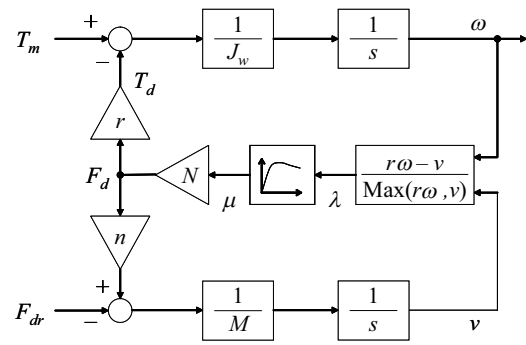


図3 車両運動モデル

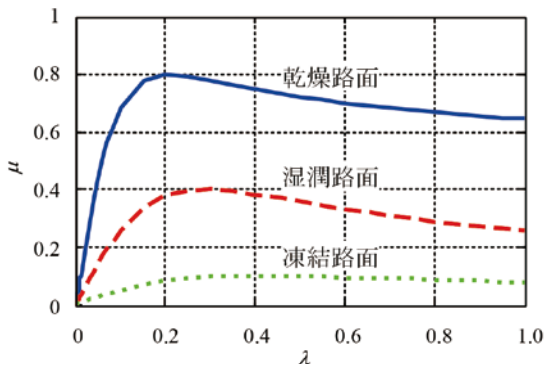


図2 μ-λ 特性

$$J_w \frac{d\omega}{dt} = T_m - r F_d \quad \dots(1)$$

$$M \frac{dv}{dt} = n F_d - F_{dr} \quad \dots(2)$$

$$F_d = \mu(\lambda) N \quad \dots(3)$$

$$\lambda = \frac{r\omega - v}{\text{Max}(r\omega, v)} \quad \dots(4)$$

$$\mu = D \sin \left( C \tan^{-1} (B(1-E)\lambda) + \frac{E}{B} \tan^{-1} (B\lambda) \right) \quad \dots(5)$$

- $T_m$  : motor torque
- $F_d$  : driving force
- $F_{dr}$  : driving resistance
- $\omega$  : wheel rotational speed
- $v$  : chassis velocity
- $J_w$  : wheel inertia
- $M$  : vehicle mass
- $r$  : tire radius
- $\lambda$  : slip ratio
- $\mu$  : friction coefficient
- $N$  : normal force
- $n$  : number of driven wheels

(1)~(5)式より、車両モデルは図3のように示すことができる。なお、簡略化のため、各駆動輪の垂直抗力  $N$  は等しいものと仮定した。本論分の中で行うシミュレーションは図2の  $\mu$ - $\lambda$  特性と図3の車両モデルを用いた。

MFCによるアンチスリップ制御のブロック図を図4に示す。コントローラ内に作成した  $\lambda=0$  の状態(粘着状態)のモデルに追従する制御系である。走行中に  $\lambda$  が増えると車輪回転速度が高くなる。その回転速度を用いて粘着状態の慣性で逆算すると、入力トルク値よりも大きなトルク値が算出される。その差分をフィルタとゲインを通してフィードバックし、モータトルクを低下させて  $\lambda$  の増大を抑制する。

なお、実車両システムにおいては、CAN通信周期による無駄時間、モータのトルク応答時間、動力伝達の遅延時間等が存在する。それらの無駄時間やトルク応答の遅れは制御システムの安定性や制御性能に影響を及ぼす。したがって図4のようにMFCシステムに無駄時間  $L$  やトルク応答時間  $\tau_m$  を加えてある。

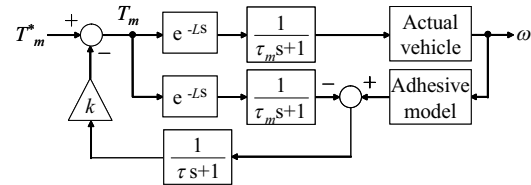


図4 MFCによるアンチスリップ制御構成

## 2.2 MFCのアンチスリップ性能

乾燥路面から発進し、凍結路面に入り、また乾燥路面に戻るといった条件で、MFCのアンチスリップ制御のシミュレーションを行った。図5に示した結果からわかるように、フィードバックゲイン  $k$  を大きくすると、スリップ率  $\lambda$  を低下させる度合いが高まるが、制御の安定性が弱まりトルクが振動的になってしまう。

また、 $k$  が大きいと、乾燥路面に戻った後のトルク値が低下してしまっている。不必要なトルク低下は、駆動力を勝手に絞ることになり、ドライバの意図する加速ができないことになる。 $k$  が小さいと乾燥路面での不必要なトルク低下は生じていないが、凍結路面でのスリップ率  $\lambda$  を低下させる度合いが低くなってしまっている。

このように、MFCでは、滑りやすい路面でのアンチスリップ性能を重視すると、制御安定性の低下や、滑りにくい路面での不必要なトルク低下が生じる。これらはトレードオフの関係にあるため、すべてを最適にすることは難しく、それぞれの許容範囲を決めて、ゲイン $k$ とフィルタ特性を設定する必要がある。

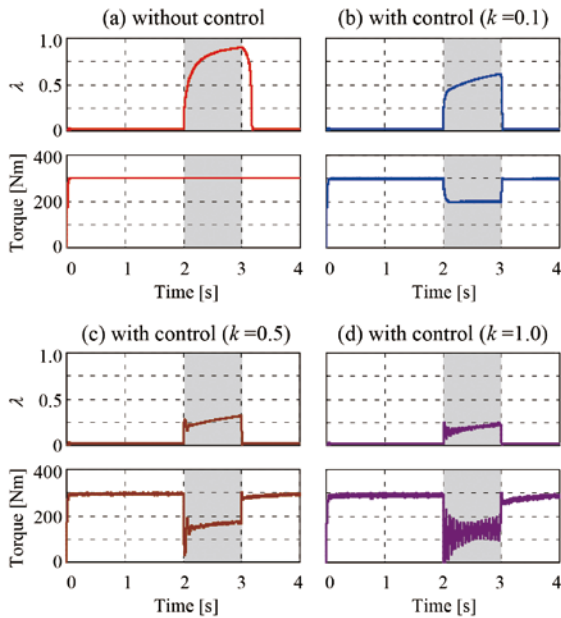


図5 MFCのシミュレーション結果 (グレーの部分が凍結路面)

### 3. 適応型モデル追従制御(Adaptive MFC)

#### 3.1 Adaptive MFCの構成

前章で述べたMFCを発展させ、どのような路面状態であっても制御が安定であり、滑りやすい路面では十分にスリップ率の増加を抑制し、滑りにくい路面では不必要なトルク低下を防止できるようなトラクション制御法であるAdaptive MFCを開発した。

Adaptive MFCの構成を図6に示す。フィルタとゲインが固定である従来型のMFCに対して、それらを適応的に設定するようにしている。これは、凍結路面では十分なスリップ抑制性能を得るためにフィードバック量を多くし、乾燥路面では不必要なトルク低下を避けるためにフィードバック量を少なくするという理由である。つまり、滑りやすい状態のときはゲインを大きくして、滑りにくい状態のときはゲインを小さくするというのが基本概念である。

図2の $\mu$ - $\lambda$ 特性からわかるように、スリップしている状態が進むほど $\lambda$ が大きくなる。また、滑りやすい路面ほど、 $\lambda$ に対して $\mu$ が小さいという特徴がある。 $\lambda$ が大きいほど、あるいは $\mu$ が小さいほど、 $k$ を大き

くする設定にすれば、滑りやすい路面では $k$ が大きくなりスリップ抑制効果が高まり、滑りにくい路面では $k$ が小さくなり不必要なトルク低下を防げる。また、フィルタの時定数 $\tau$ は、 $k$ に応じて設定されるようにすることで、常に安定性を確保することができる。すなわち、走行しながら $\lambda$ と $\mu$ をリアルタイムで推定し、推定 $\lambda$ 値と推定 $\mu$ 値を用いて $k$ および $\tau$ を算出するようにするのがAdaptive MFCの構成である。

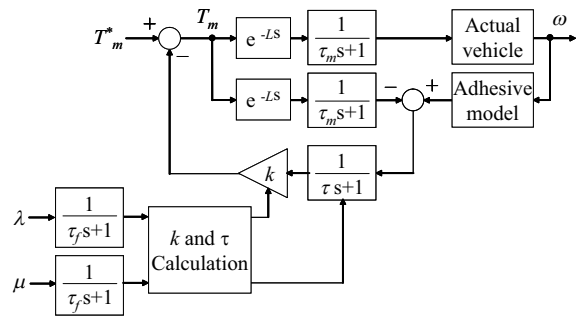


図6 Adaptive MFCによるアンチスリップ制御構成

#### 3.2 ゲイン $k$ の生成

前述したように、図2の $\mu$ - $\lambda$ 特性は、スリップしている状態が進むほど $\lambda$ が大きく、滑りやすい路面ほど $\mu$ が小さいという特徴がある。よって、 $\lambda$ を $\mu$ で除算した $\lambda/\mu$ という値は、滑りやすい状態であるほど大きくなり、滑りにくい状態であるほど小さくなる。したがって、 $\lambda/\mu$ を用いてゲイン $k$ を生成することにより、自動的に、乾燥路面では低ゲインになってフィードバック量が少なくなり、凍結路面では高ゲインになってフィードバック量が多くなる。

したがって、 $\lambda/\mu$ に係数を乗じた適応ゲインと、定数である固定ゲインを加えた次の(6)式を用いてゲイン $k$ を生成する構成にした。

$$k = a \frac{\lambda}{\mu} + b \quad \dots(6)$$

図6に示すように、走行中の $\lambda$ と $\mu$ の推定にはノイズ除去のためにフィルタを挿入する必要がある。そのため、実際の $\lambda$ や $\mu$ に対して推定結果は僅かながら時間遅れが生じることになる。そうすると、急に滑りやすい路面に突入した場合は、推定 $\lambda$ の立上りと推定 $\mu$ の立下りが遅れるため、 $\lambda/\mu$ の値も遅れることになる。そのため、適応ゲインのみでは、滑り始めた直後のゲイン $k$ が小さくスリップ抑制が遅れるという問題が生じるが、固定ゲインによって、滑り始めのゲインが小さいままという状態を防止することができる。

適応ゲイン係数 $a$ と固定ゲイン定数 $b$ を適切に設定することにより、滑りやすい路面での十分なスリップ抑制性能と、滑りにくい路面での不必要なトルク低

下防止を両立させることができる。また、急に滑りやすい路面に入った場合にも遅れの少ない制御が可能となる。

### 3.3 時定数 $\tau$ の生成

フィードバックループ内に挿入されているフィルタが固定のままでは、ゲイン  $k$  が大きくなると不安定になりやすい。よって、ゲイン  $k$  が変化してもシステムの安定性を確保するようフィルタの時定数  $\tau$  も適応的に設定する必要がある。その考え方を以下に述べる。

実車両モデル  $P(s)$  は、(4)式から  $v$  を求めて(1)(2)式に代入することにより、トルク  $T_m$  から  $\omega$  までの伝達関数として(7)式で求められる ( $s$  はラプラス演算子)。なお、 $\lambda$  の変化は小さいと見なして  $\lambda$  の微分を0とし、走行抵抗  $F_{dr}$  は小さいものとして無視した。

$$P(s) = \frac{n}{J_w n + M r^2 (1 - \lambda) s} \dots (7)$$

したがって、粘着モデル  $P_n^{-1}(s)$  は、(7)式に  $\lambda = 0$  を代入し、分母分子を入れ替えることにより、(8)式で求められる。

$$P_n^{-1}(s) = \frac{J_w n + M r^2}{n} s \dots (8)$$

CAN通信周期や動力伝達の遅延時間等のシステム全体の無駄時間  $L$ 、モータのトルク応答時間  $\tau_m$ 、 $\lambda$  や  $\mu$  の推定に挿入したフィルタの時定数  $\tau_f$  を考慮すると、トルク指令値  $T_m^*$  からトルク入力値  $T_m$  までの伝達関数  $G(s)$  は(9)式となる。

$$G(s) = \frac{1}{1 + e^{-Ls} \frac{1}{\tau_m s + 1} \frac{1}{\tau_f s + 1} \frac{k}{\tau s + 1} \frac{M r^2 \lambda}{J_w n + M r^2 (1 - \lambda)}} \dots (9)$$

(9)式からわかるように、分母のパラメータがシステム特性を決定しているため、(10)式に示す一巡伝達関数  $G_o(s)$  を用いてシステムの安定性を検討した。

$$G_o(s) = e^{-Ls} \frac{1}{\tau_m s + 1} \frac{1}{\tau_f s + 1} \frac{k}{\tau s + 1} \frac{M r^2 \lambda}{J_w n + M r^2 (1 - \lambda)} \dots (10)$$

(10)式から、 $\lambda$  値は一巡伝達関数のゲインに関係することがわかり、 $\lambda$  が1に近づくほどゲインが大きくなる。フィードバック系はゲインが大きいほど安定性が低くなるのが一般的であるため、 $\lambda$  がどのような値になっても安定性を確保するには、最もゲインが大きい  $\lambda = 1$  の条件下で安定性を検討すれば良い。本検討で

は、(10)式に  $\lambda = 1$  を代入し、Bode線図を描いてゲイン余裕と位相余裕を求めることで安定性を評価することにした。なお、ゲイン余裕10[dB]以上かつ位相余裕40[deg]以上を安定性確保の目安とした。

2輪駆動( $n=2$ )の場合を想定し、 $k=0.1, 1, 10$  のときに  $\tau$  を0.4[s]に固定した場合のBode線図を図7(a)に示す。 $k=0.1$  のときは安定であるが、 $k=1$  と  $k=10$  の場合はゲイン余裕と位相余裕が無くなり不安定である。

一方、(11)式で示すように、ゲイン  $k$  に係数を乗じて時定数  $\tau$  を生成することにより、ゲインが0[dB]を横切る周波数と、位相が-180[deg]を横切る周波数がほぼ一致し、ゲイン余裕と位相余裕がほとんど変化しないようにできる。

$$\tau = c k \dots (11)$$

(11)式の時定数係数  $c$  を4とした  $\tau = 4k$  という式を用いて  $\tau$  を生成した場合のBode線図を図7(b)に示す。この図を見るとわかるように、周波数特性のカーブが途中から重なり、ゲインが0[dB]を横切る周波数と位相が-180[deg]を横切る周波数がほぼ一致し、ゲイン余裕が12[dB]程度、位相余裕が60[deg]程度の値で同じ安定度を維持している。つまり、 $k$  に合わせた  $\tau$  の生成によって安定性を確保できることを示している。

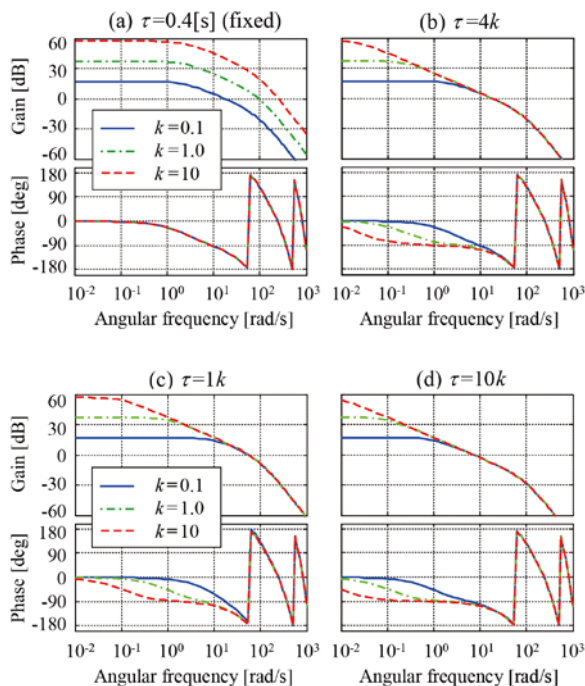


図7 ゲイン  $k$  の違いによる Adaptive MFC の Bode 線図

時定数係数  $c$  を1とした  $\tau = 1k$ 、および  $c$  を10とした  $\tau = 10k$  の場合を、図7(c)(d)に示す。いずれも図7 (b)と同

じょうに周波数特性が途中から重なるようになるが、ゲインが0[dB]となる交差周波数の違いにより、ゲイン余裕と位相余裕が異なる。 $\tau=1k$ の場合は、ゲイン余裕が0.1[dB]程度、位相余裕が0.5[deg]程度であり安定度が低く、 $\tau=10k$ の場合は、ゲイン余裕が20[dB]程度、位相余裕が78[deg]程度であり安定度が高い。一方、応答性は交差周波数が高い方が良いため、 $\tau=10k$ の場合よりも $\tau=1k$ の場合の方が優れる。システムのモデル化誤差や外乱などを考慮し、安定性と応答性のバランスを検討した上で $\tau$ の係数が決定される。

なお、4輪駆動( $n=4$ )の場合は $\tau=2k$ とすると、2輪駆動( $n=2$ )の $\tau=4k$ の場合と同等のゲイン余裕と位相余裕が得られることを確認した。

#### 4. 車両システムへのAdaptive MFCの適用

##### 4.1 実験車両

走行実験に用いた車両は、ダイレクトドライブ式アウトロータ型インホイールモータを4輪に搭載した電気自動車であり、各モータを独立に制御可能である。車両外観を図8に、システム構成を図9に、車両諸元を表1に示す。

実験車両は4輪駆動車であるが、今回は、前2輪を非駆動輪、後2輪を駆動輪とし、後輪モータへのトラクション制御により、滑りやすい路面でのアンチスリップ制御実験を実施した。



図8 実験車両外観

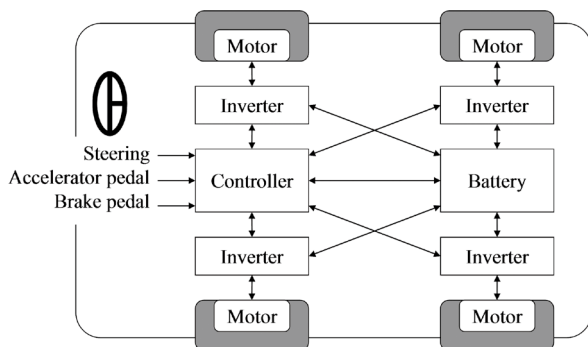


図9 実験車両のシステム構成

表1 実験車両諸元

Dimensions (L/W/H)	4700/1600/1550 [mm]
Total weight	1650 [kg]
Drive	4WD
Tire	175/65R15
Tire radius	295 [mm]
Motor Type	Outer rotor direct drive in-wheel motor
Maximum power / 1 motor	65 [kW]
Maximum torque / 1 motor	700 [Nm]

##### 4.2 システム構成

車両システムに搭載するAdaptive MFCの全体構成を図10に示す。 $\mu$ は、(1)式と(3)式に基づいて、駆動輪の回転速度とトルク入力値からオブザーバで駆動力 $F_d$ を推定し、それを垂直抗力 $N$ で割って $\mu$ を算出する<sup>(2)</sup>。垂直抗力 $N$ は事前にコーナーウェイトで測定した各輪荷重値を用いた。また $\lambda$ はオブザーバを用いた推定方法<sup>(7)</sup>も提案されているが、本検討においては、非駆動輪とした前輪の回転速度と、駆動輪である後輪の回転速度から $\lambda$ を算出することにした。また、 $\lambda$ と $\mu$ の推定に、いずれもノイズ除去のために時定数10[ms]の1次ローパスフィルタを挿入した。推定した $\lambda$ と $\mu$ の値を用いて(6)式と(11)式から $k$ と $\tau$ を適応的に生成する構成である。

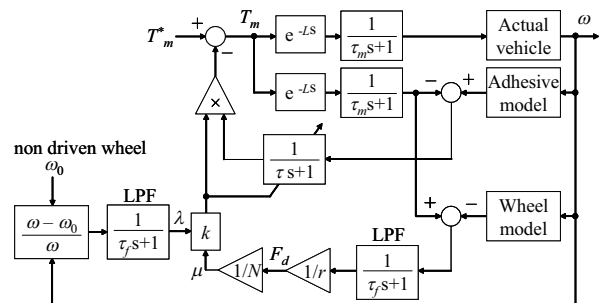


図10 実験車両に搭載したAdaptive MFCの構成

##### 4.3 適応ゲイン係数，固定ゲイン定数，時定数係数の設定

実験車両へのAdaptive MFCの適用により、滑りやすい路面に入った際に、すばやく、なめらかに、十分なアンチスリップ性能を得ることが目的である。よって、

- ① 制御が安定で振動的にならないこと
- ② 1[s]より十分早く効果が得られること
- ③ 制御無しの場合と比べて6[dB]以上のスリップ抑制が得られること

の3項目を満たすことを制御の目標仕様とした。

その3項目を満たすように、適応ゲイン係数 $a$ ，固定ゲイン定数 $b$ ，時定数係数 $c$ を検討した結果、本検討では $a=0.08$ ， $b=0.04$ ， $c=4$ とした。

図11で示す3つの動作点を例にとると、X点よりY点は滑りやすい路面であり、Y点よりZ点はより滑っている状態である。(6)式によって算出されるX点、Y点、Z点でのゲインは、それぞれ $k=0.06, 0.20, 0.84$ となる。したがって、X点→Y点→Z点の順で $k$ が大きくなっており、路面状態や走行状態に応じて $k$ が生成されている。

また、Bode線図での安定性検討結果から、 $c=4$ としたが、X点とY点での時定数はそれぞれ $\tau=0.24, 0.8$ [s]であるため、乾燥路面から凍結路面に急に变化した場合でも1[s]より早い制御応答が実施可能となる。

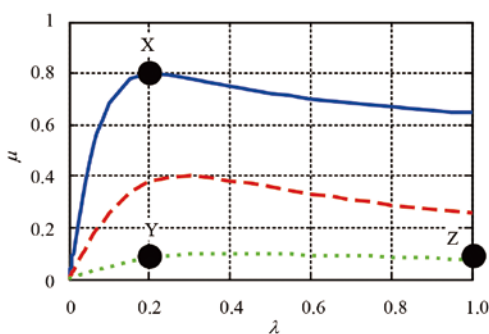


図11  $\mu$ - $\lambda$ 特性上の各動作点

## 5. シミュレーションおよび実験

### 5.1 シミュレーション

実車両を用いた走行実験に先立ち、乾燥路面から発進し、凍結路面に入り、また乾燥路面に戻るという条件でシミュレーションを行った。図12(a)(b)に、時定数係数 $c=4$ とした場合と、比較のために制御を行わない場合のシミュレーション結果を示す。Adaptive MFCの適用により、凍結路面で入力トルク値が低減され、その結果、駆動輪の回転速度の上昇を防止できおり、制御無しの場合と比べて6[dB]以上のスリップ抑制が得られている。MFCと比較して、乾燥路面での必要なトルク低下を回避できていることがわかる。

また、Bode線図で確認した時定数係数 $c=1$ と $c=10$ の場合のシミュレーション結果を図12(c)(d)に示す。時定数係数 $c$ 値による違いを見ると、 $c=1$ の場合は応答性が良く、スリップ率の抑制度合いは大きいですが、3.3で述べたように安定余裕が少ないため、発振はしていないものの制御が振動的になっている。一方、 $c=10$ の場合は応答性が悪く、スリップ抑制度合いは大きくないが、安定余裕が大きいため滑らかな制御ができている。 $c=4$ の場合は、スリップ率の抑制度合いと制御の滑らかさという観点で、バランスが取れていると判断できる。

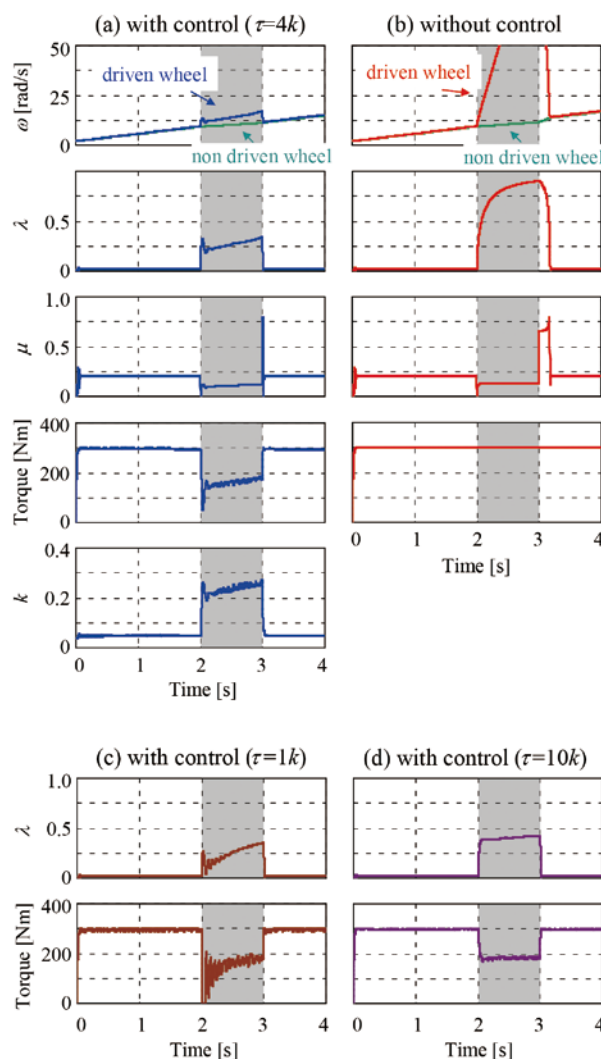


図12 Adaptive MFCのシミュレーション結果

### 5.2 走行実験

シミュレーションと同じような条件として、図13に示すように、アスファルト上に約2[m]のアルミ合金板を接地し、放水して滑りやすい路面を形成し、この場所を走行する途中のスリップ抑制性能を検証した。なお、300[Nm]一定のトルク指令値を後2輪に与え、前2輪は非駆動輪とした。

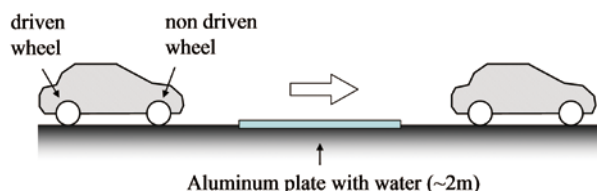


図13 アンチスリップ制御テスト環境

図14(a)(b)に、時定数係数 $c=4$ とした場合と、比較のために制御を行わない場合の走行実験結果を示す。シミュレーション結果と同様に、滑りやすい路面で入

カトルク値が低減され、その結果、駆動輪の回転速度の上昇を防止できている。この結果では、振動的な制御とならずに、アルミ板に乗って100[ms]後、およそ30[cm]進むまでの間に制御がはたらき、6[dB]以上のスリップ抑制が得られていることがわかる。よって、4.3で述べた3項目の制御目標を満足することが確認された。

また、時定数係数 $c=1$ と $c=10$ の場合のAdaptive MFCを実施した場合の比較結果を図14(c)(d)に示す。時定数係数 $c$ 値による違いを見ると、 $c=1$ の場合は振動的であり、 $c=10$ の場合はスリップ抑制度合いが劣っていると言える、したがって、 $c=4$ の場合が、スリップ率の抑制度合いと制御の滑らかさという観点で最も良い結果と言える。

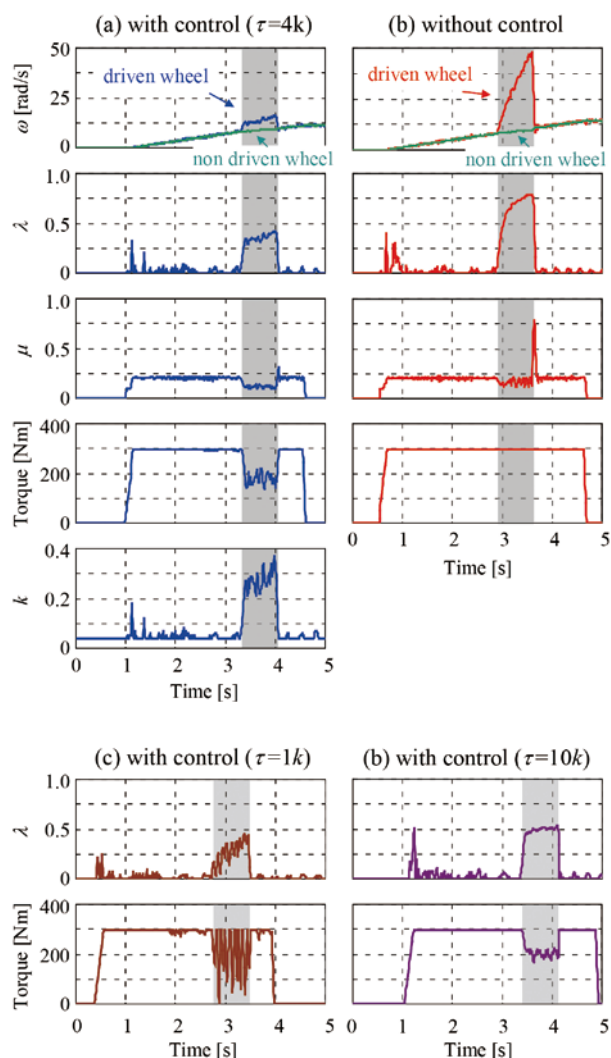


図14 Adaptive MFCの走行実験結果

## 6. プロブカーシステムへの展開

前章までは、 $\lambda$ と $\mu$ をリアルタイムで推定して $k$ と $\tau$ を算出する方法を述べたが、車体速度 $v$ や垂直抗力 $N$ の検出が不能で、 $\lambda$ や $\mu$ を推定できない車両での制御方法を考察する。

現在、詳細な渋滞情報の把握等に実用化されているスマートループ<sup>(8)</sup>等のプロブカーシステムの活用を考える。図15で示すように、 $\lambda$ や $\mu$ を推定した複数の車両が位置情報と共にプロブカーシステムサーバーに送信し、サーバーでは統計的処理を用いて路面状態を推定する。A車とB車はタイヤのタイプによって $\mu$ - $\lambda$ 特性は異なるものの、滑りやすい路面ほど $\lambda$ に対して $\mu$ が小さくなる傾向には相違がないため、例えば各車の $\mu$ と $\lambda$ の変化度合いにより路面状態を推定することが可能である。そして推定した路面状態を例えば10段階で数値化して位置情報を付加することで、路面状態マップを生成する。

走行車両は、数値化された路面状態情報をサーバーから随時受信し、その値に応じてモデル追従制御の $k$ と $\tau$ を生成する。これにより、サーバーからの路面状態情報に適した $k$ と $\tau$ が設定されることになる。したがって、C車は $\lambda$ や $\mu$ を推定できない車両であったとしても、プロブカーシステムの活用により、事前に前方道路の路面状態を把握でき、滑りやすさに適したトラクション制御が可能となる。

また、路面状態マップによって滑りやすい地点が事前に把握できることは、電気自動車だけでなく、すべての自動車にとって有益となる。例えば、滑りやすい路面を回避したルート案内や、滑りやすい路面の手前で運転手に注意を促すことができるため、事故の危険を未然に防ぐことが容易となる。

したがって、電気自動車の制御技術とカーナビゲーション技術の連携によって、より安全性の高い走行支援システムが可能となる。

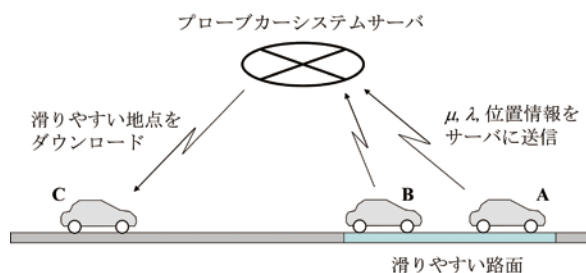


図15 プロブカーシステムとの連携

## 7. まとめ

アンチスリップ制御のためのモデル追従制御(MFC)の性能向上を目的に、走行中のスリップ率 $\lambda$ と摩擦係数 $\mu$ に適応してフィードバックゲイン $k$ とフィルタ時定数 $\tau$ を生成する方法として適応型モデル追従制御(Adaptive MFC)を開発した。

システムの無駄時間とトルク応答時間などを考慮して $k$ と $\tau$ の関係を適切に設定することで、安定性と制御性能を確保し、滑りやすい路面でのスリップ抑制性能の向上と、滑りにくい路面での不必要なトルク低下の防止が可能であることをBode線図による安定性検討やシミュレーションによって示した。

①振動的でない制御、②1[s]より十分に早い応答、③6[dB]以上のスリップ抑制効果、の項目を満たすことを目標として、適応ゲイン係数と固定ゲイン定数、および時定数係数を適切に設定してアンチスリップ制御の実験を行った。その結果、滑りやすい路面に入ってから100[ms]後にはスリップ抑制機能がはたらき、振動的にならずに滑らかなアンチスリップ制御が実現できたことを確認した。

加えて、プローブカーシステムの活用による路面状態マップの生成により、 $\lambda$ や $\mu$ を推定できない車両においても路面状態に適応した制御の適用が可能であることを見出した。このことは、電気自動車の制御技術とカーナビゲーション技術の連携によって、より安全性の高い車社会の実現に貢献できることを示している。

今後は、速い速度での検証、長い低 $\mu$ 路での検証、4輪駆動での動作検証を行い、Adaptive MFCの更なる性能向上と実用化に向けた検討を進める予定である。



## 参 考 文 献

- (1) Tomoyuki Shinkai, Hiroshi Yoshida, Takashi Komatsu, Ichiro Hatayama, Katsuyuki Hayashi, Takahisa Kamikura, Osamu Shimizu, and Hiroshi Shimizu : "SIM-LEI", the revolutionary efficient electric vehicle with in-wheel, EVS26, (2012)
- (2) 坂井真一郎, 堀洋一: 電気自動車の新しい車両運動制御に関する研究, 東京大学学位論文 (1999)
- (3) 齋藤健夫, 藤本博志, 野口季彦: スリップ率及びヨーモーメントオブザーバを用いた電気自動車の操縦安定化制御法, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-03-52, p.41-46 (2003)
- (4) 加藤正浩, 殷徳軍: インホイールモータ型電気自動車における路面状態に適応したトラクション制御法, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.10-12 (2012)
- (5) 加藤正浩, 殷徳軍: 適応型モデル追従制御による電気自動車のスリップ抑制制御法, 自動車技術会論文集, Vol.44, No.2, p.435-440 (2013)
- (6) H.B. Pacejka, E. Bakker : "The Magic Formula Tyre Model", Vehicle System Dynamics, Vol. 21, No.1, p. 1-18 (1992)
- (7) 藤井淳, 藤本博志: 車体速検出が不要なスリップ率オブザーバの提案, 電気学会産業応用部門大会, JIASC2006, Vol.2, p.503-506 (2006)
- (8) 佐々木優, 村田利幸, 海津浩之, 武田賢司: スマートループの開発, PIONEER R&D, Vol.18 No.1 (2008)

## 筆 者 紹 介

### 加藤 正浩 (かとう まさひろ)

研究開発部 第9研究部 所属。

DVD-R, DVD-RWの記録技術開発, 物理フォーマット開発, 高密度光ディスクシステムのサーボ技術開発を経て, 現在電気自動車のモータ制御および車両運動制御の研究に従事。

2010年1月~2011年3月, (株)SIM-Driveの先行開発車事業第1号の電気自動車開発プロジェクトに参加。

計測自動制御学会, 自動車技術会に所属

### 殷 徳軍 (いん でじゅん)

慶應義塾大学 SFC研究所 所属。博士。

電気電子機器メーカーで組み込み制御システム開発業務を経験した後, 東京大学にて電気自動車の運動制御の研究に従事し博士号を取得。現在慶應義塾大学にてインホイールモータ型電気自動車の駆動システムと車両運動制御の研究に従事。

電気学会, 自動車技術会, IEEE Industrial Electronics Societyに所属