

# 電気自動車時代に対応した操縦性・安定性向上手法

## Improvement in Maneuverability and Stability in the Age of Electric Vehicles

吉野 貴彦\*)  
Takahiko Yoshino

野崎 博路\*\*\*)  
Hiromichi Nozaki

自動車の駆動源だけに留まらず、各種走行装置の電動化の方向が加速している。電動化を進めることにより、車両運動を支配するタイヤに働く力を任意に制御することが可能となる。さらには、制御装置のバイ・ワイヤ化により設計自由度を格段に広げることが可能になる。そこで、本論文では、電気自動車時代に対応した操縦性・安定性向上手法について考察を行った。

In addition to the driving sources of vehicles, there has also been very rapid development in the electric motorization of various travelling equipment. By promoting motorization, it is possible to arbitrarily control the force acting on the tire that governs the movement of a car. Furthermore, it is also possible to markedly widen the degree of freedom in design via by-wire control devices. Therefore, in this paper, we examined the methods to enhance maneuverability and stability in accordance with the new age of electric vehicles.

### 1. はじめに

最近、自動車の駆動源だけに留まらず、各種走行装置の電動化の方向が加速している。完全な電動化が達成されると、車両運動制御技術は一段と進化したものになることが期待される。例えば、電気自動車において四輪インホイールモータ方式を採用すれば、制駆動が四輪独立に制御可能となる。また、前後輪のみならず全輪を電磁的なアクチュエータで独立に舵角制御を行ったり、アクチュエータでタイヤのキャンバ角を大きな舵角で制御することも機構上容易にできる。つまり、電動化を進めることにより、車両運動を支配するタイヤに働く力を任意に制御することが可能となる。さらには、このような制御装置のバイ・ワイヤ化により設計自由度を格段に広げることが可能になる。

以上の背景をもとに、本論文は、電気自動車時代に対応した操縦性・安定性向上手法に関する研究として、コーナリング限界領域の運動性能向上を目的に、タイヤのキャンバ角を積極的にコントロールした例を示し、その有効性を紹介する。

### 2. キャンバ角制御の効果解析

タイヤにキャンバ角がつくとキャンバスラストといわれる横力が発生する<sup>(1)</sup>。タイヤのキャンバ角を制御すればどの程度、旋回限界横加速度とヨーモーメントの2つをコントロールすることができるのかモーメント法<sup>(2,3)</sup>にて解析を行った。

#### 2-1. モーメント法

図1に車両重心点の横運動とヨー運動を拘束して、直進走行をさせた車両を上から見た図を示す。重心点拘束状態での重心点横滑り角を $\beta$ 、この拘束条件における前輪の操舵角を $\delta^*$ とする。前輪の横滑り角 $\beta_1$ 、後輪の横滑り角 $\beta_2$ と、この $\beta$ と $\delta^*$ との関係は下式のようなになる。

$$\beta_1 = \delta^* + \beta \quad (1)$$

$$\beta_2 = \beta \quad (2)$$

車両の全ての運動状態は $\beta_1$ と $\beta_2$ の組み合わせで表現できる。これにより図1の拘束条件における $\beta$ と $\delta^*$ をパラメータとして車体に働く力とモーメントを調べることで車両の運動特性全体が表現できる。図1の拘束条件において、前輪舵角 $\delta^*=0$ の時の、車体の横滑り角 $\beta$ に対するサイドフォース特性は図2になる。これらにより式3の車体に作用する4輪のサイドフォースの合計値 $F$ は図3、式4の復元モーメント $M$ の値は図4となる。この特性を横加速度に対して記述すると図5のようなになる。

車両の運動状態は式(1)、式(2)で与えられる前後横すべり角 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ の組み合わせで全て表現できることから、モーメント法により線形、非線形、定常、過渡を含む全領域での車両運動特性を表すことができる。

$$F = F_f + F_r \quad (3)$$

$$M = -a \cdot F_f + b \cdot F_r + (T_{SA,1} + T_{SA,2} + T_{SA,3} + T_{SA,4}) \quad (4)$$

( $T_{SA,1-4}$  : 各輪のタイヤのセルフアライニングトルク)

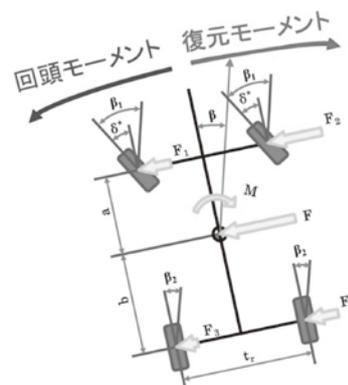


図1 重心点拘束モデル

\*) 久留米工業大学・工学部・講師      \*\*\*) 工学院大学・工学部・教授

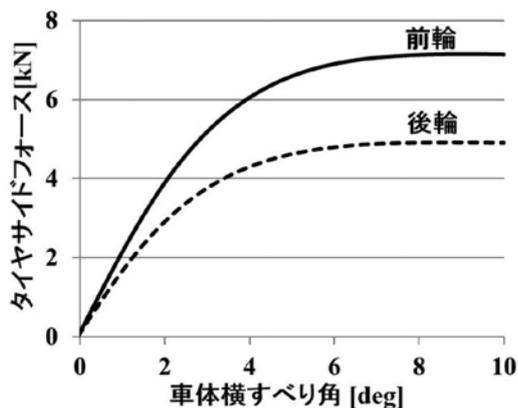


図2 前後輪コーナリング特性

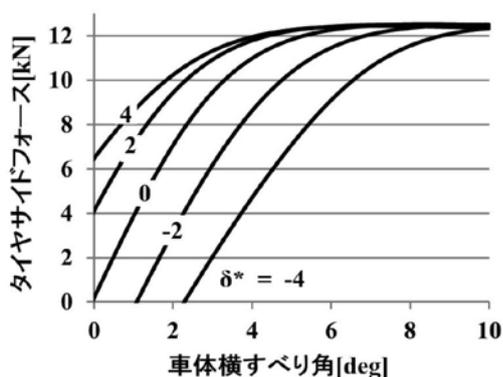


図3  $\beta$ -サイドフォース線図

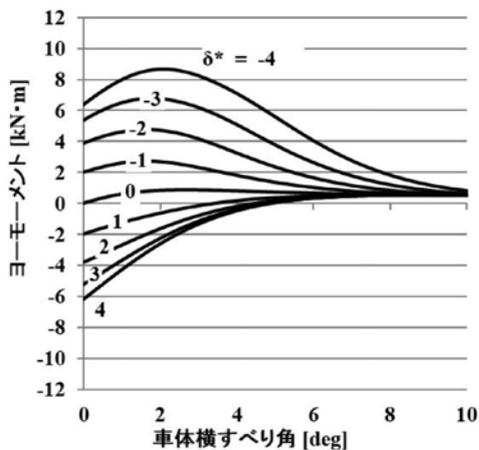


図4  $\beta$ -ヨーモーメント線図

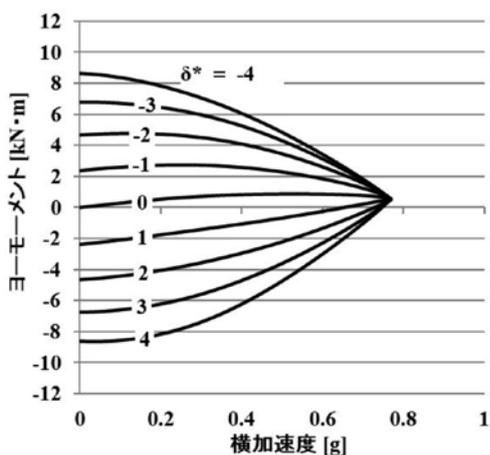


図5  $Y_G$ -ヨーモーメント線図

## 2-2. モーメント法を用いた計算と解析結果

車両質量  $m=1600\text{kg}$ , ホイールベース  $l=2.5\text{m}$ , 車両前後の重量配分は 60:40 の一般的な車両諸元を用いて, キャンバ角制御の効果解析を行った. キャンバラストの効果をも有効活用するため, タイヤはトレッド形状の丸いタイヤを使用した. また, キャンバ角に対する独立の影響をみるためにサスペンション特性については省略した. ここで, キャンバ角は旋回している方向に傾けることをネガティブキャンバ角, 旋回方向とは逆方向に傾けることをポジティブキャンバ角とする.

図6は前輪ネガティブキャンバ角 20 度, 後輪ネガティブキャンバ角 20 度つけた時の車体横すべり角に対するヨーモーメント線図である. キャンバ角 0 度の時のヨーモーメント線図である図4と図6を比較すると, ネガティブキャンバ角を付けることで定常円旋回を維持できる限界の横滑り角が向上している.

図7は前輪ネガティブキャンバ角 20 度, 後輪ネガティブキャンバ角 20 度つけた時の横加速度に対するヨーモーメント線図である. キャンバ角 0 度の時のヨーモーメント線図である図5と図7を比較すると, ネガティブキャンバ角を付けることで定常円旋回を維持できる限界横加速度が向上している. ネガティブキャンバ角を付けることで 20% 限界横加速度の向上が期待できる.

## 2-3. 左右駆動力制動力配分制御とキャンバ角制御のモーメント法による評価

キャンバ角制御と左右駆動力制動力配分制御の制御幅を比較する. モーメント線図にて異なった制御手法の効果度合いと, その領

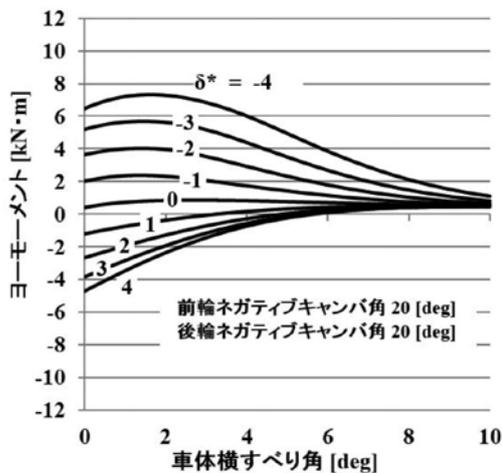


図6  $\beta$ -ヨーモーメント線図

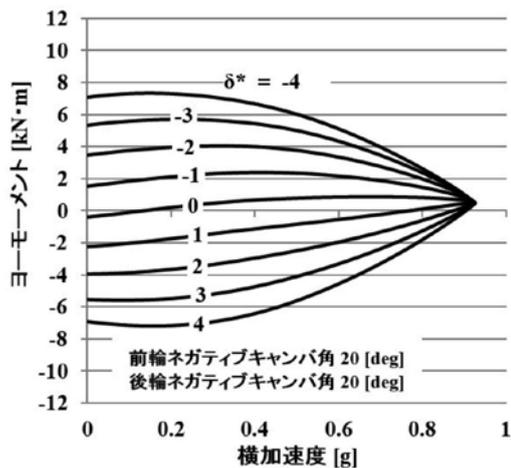


図7  $Y_G$ -ヨーモーメント線図

域を同一のグラフ上で比較検討する。

前後輪の駆動力配分 50 : 50 の四輪駆動車 (図 8) において, 前輪及び後輪でそれぞれ左右駆動力制動力配分を行なった場合を考える。前輪の制御可能な駆動, 制動力を  $\Delta T_f$ , 後輪の制御可能な駆動, 制動力を  $\Delta T_r$  とする。なお  $\Delta T > 0$  を駆動力とする。  $\Delta T_f$ ,  $\Delta T_r$  にトレッドを乗じた復元ヨーモーメント  $M_{yf}$ ,  $M_{yr}$  は以下ようになる。

$$M_{yf} = -\Delta T_f \cdot t_f \quad (5)$$

$$M_{yr} = -\Delta T_r \cdot t_r \quad (6)$$

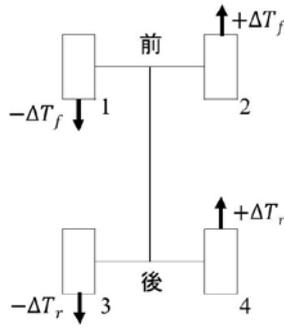


図 8 制駆動力配分車両イメージ

図 9 に前輪実舵角  $\delta^* = 0$  の条件で解析した 4 輪の制駆動力制御による制御幅を示す。横滑り角が増加するにつれて左右駆動力制動力配分制御によるヨーモーメントの制御幅が減少しているが, これは内外輪荷重移動により摩擦円が小さくなる内輪の制駆動力限界により生じている。

図 10 は前輪実舵角  $\delta^* = 0$  の条件でキャンバ角制御の効果を解析したものである。前後輪キャンバ角バランスを変化させることで, コーナリング限界においてヨーモーメントを回頭側から復元側まで正負に変化させることができ, 左右駆動力制動力配分制御以上の効果が期待できる。

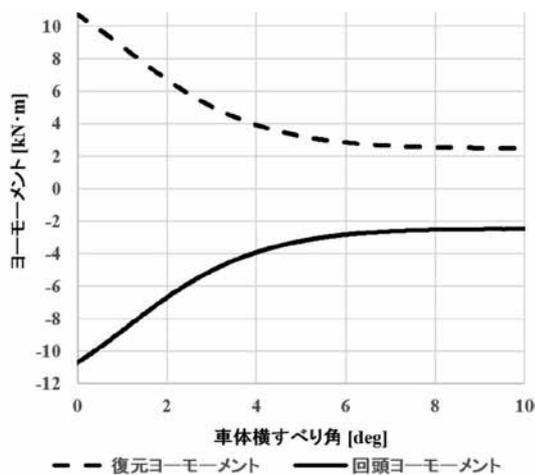


図 9  $\beta$ -ヨーモーメント線図

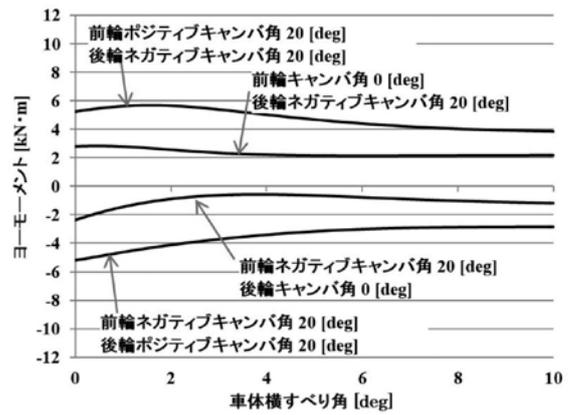


図 10  $\beta$ -ヨーモーメント線図

### 2-4. 車両運動シミュレーションによる解析

3 自由度系 (ヨーレート, 車体スリップ角, ロール) の車両モデルを用いて, 操舵角に応じたキャンバ角コントロールの効果解析を行った。

車速 95km/h での走行中, 前輪実舵角 4 度のステップ操舵を入力する。キャンバ角制御は, 操舵角と同時に前後輪対地ネガティブキャンバ角制御 (20 度) を行う。

キャンバ角制御を行っていない場合は, ステップ操舵入力後に, 車両が定常状態に落ち着いた時の横加速度 (図 11) の値は, モーメント法解析による定常円旋回を維持できる限界値 (図 5) とほぼ同じ値になっており, コーナリング限界をシミュレーションしていることがわかる。

操舵角比例対地ネガティブキャンバ角制御を行った場合はコーナリング限界性能が大きく向上している。

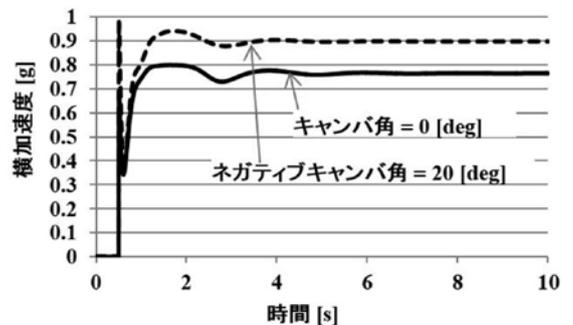


図 11 横加速度

## 3. サスペンションコントロールを適用した電気自動車

本研究では, 車体フレームから設計を行い, ステア・バイ・ワイヤにより操舵角比例方式・対地ネガティブキャンバコントロール可能な, サスペンションコントロール車両の製作を行った。

### 3-1. サスペンションコントロール車両の概要

サスペンションコントロール車両の概観図を図 12 に示す。実験車両はステア・バイ・ワイヤシステムと 4 輪のアクティブキャンバ装置で構成されている。4 つの車輪に独立したセンサおよびアクチュエータが設置され, 独立に制御可能である。本車両により操舵角比例方式・4 輪キャンバ角制御を行うことができる。

図 13 に前輪のキャンバ角制御ユニットを示す。ユニット化するこ

とで、様々なサスペンションの試験が可能となる。図14にキャンバ角制御機構を示す。ポテンショメータによりステア・バイ・ワイヤのハンドル角を検出し、モータの駆動によりリニアレールが左右に移動する。サスペンションのアップアームがリニアレールに固定されており、タイヤのキャンバ角を左右に±20度変化させることができる。図15に製作車両を示す。



図15 サスペンションコントロール車両

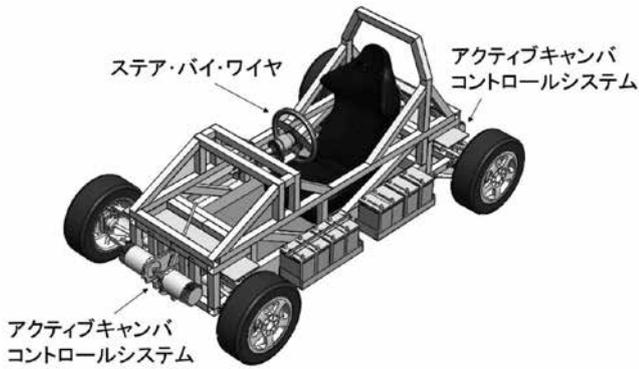


図12 車体の概観図

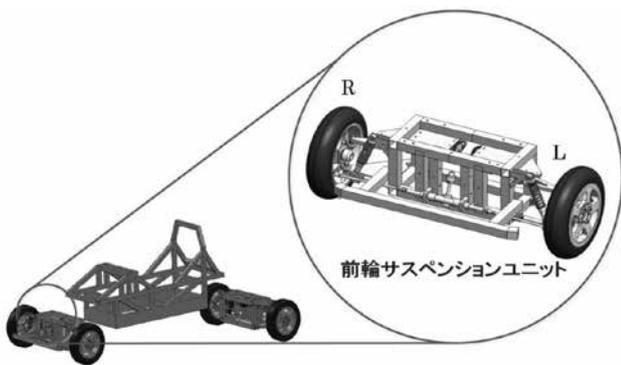


図13 前輪サスペンションユニット

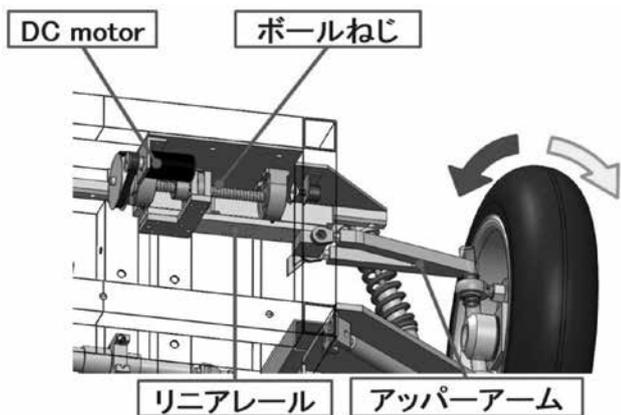


図14 キャンバ角制御機構

### 3-2. スラローム走行実験とフィーリング評価結果

間隔9m×6のパイロンスラロームコースにて、ドライバによるフィーリング評価を行った。操舵角比例方式・キャンバ角制御有り無しの2パターンで比較を行った。

ドライバによるフィーリング評価の結果、操舵角比例方式・キャンバ角制御を行うことで、前輪は舵の効きが向上することを確認できた。後輪では、キャンバ角制御により車両の横滑りが低減したことを確認できた。

ステア・バイ・ワイヤにより操舵角比例方式・キャンバ角制御を行うことで、限界コーナリング時の操縦性・安定性が大きく向上できることを確認している。

## 4. おわりに

電気自動車時代に対応した操縦性・安定性向上手法に関する研究として、主にコーナリング限界領域の運動性能に関する研究を進めている。モーメント法やダイナミックシミュレーション、実車実験において、大キャンバ角制御の効果を確認した。その結果、コーナリング限界コントロール性が向上することを確認した。

キャンバ角を積極的にコントロールすることで、コーナリング限界時のヨーイングコントロールのみならず、横加速度方向のコントロールも可能となる。

各種走行装置の電動化によって、運転に従来以上の自在性が得られ、一層新しい走行安定性技術が発展していくことが望まれる。

### 参考文献

- 1) 小林弘、大山鋼造、兼島政弥、実走行時のタイヤ接地特性計測技術、自動車技術会論文集、Vol.39、No.6、35-40、(2008)。
- 2) Shibahata, Y. Shimada, K. Tomari, T., The Improvement of Vehicle Maneuverability by Direct Yaw Moment Control, *Proceedings of AVEC'92*, 923081, pp. 452-457, (1992).
- 3) 芝端康二、島田和彦、泊辰弘、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、54-60、(1993)。
- 4) Yoshino, T. Nozaki, H., About the Effect of Camber Control on Vehicle Dynamics, *SAE Paper*, 2014-01-2383, pp.1-10, (2014).