

〔技術報告〕

モーメント線図を用いた左右駆動力制動力配分制御と キャンバ角制御の運動性能評価

吉野 貴彦*¹・野崎 博路*²

Evaluation of Motion Performance to Camber Angle Control and Left and Right Wheels
Driving and Braking Force Distribution Using Moment Diagram

Takahiko YOSHINO*¹, Hiromichi NOZAKI*²

Abstract

In recent years, the conversion of vehicles to electric power has been accelerating, and if a full conversion to electric power is achieved, further advancements in vehicle kinematic control technology are expected. Therefore, it is thought that kinematic performance in the critical cornering range could be further improved by significantly controlling not only the steering angle but also the camber angle of the tires through the use of electromagnetic actuators. This research focused on a method of ground negative camber angle control as a technique to improve maneuverability and stability to support the new era of electric vehicles, and the effectiveness thereof was clarified. As a result, it was found that in the critical cornering range as well, camber angle control can control both the yaw moment and lateral acceleration at the turning limit.

Keywords : Vehicle Dynamics, Stability, Maneuverability, Camber Control, Yaw Moment

1. 緒 言

自動車の運動性能向上技術は4輪操舵(4WS)が提案されて以来、数々の発展を遂げてきた。4WSは制御系の数学モデルが比較的簡単に記述できるので、先端制御則を適用する格好の制御対象として多くの研究者に取り上げられ、様々な制御のアルゴリズムが提案された⁽¹⁾⁻⁽¹⁰⁾。操舵によるタイヤスリップ角の制御は低い横加速度の運動状態では極めて有効な制御手法となる。しかし、大きな横加速度や前後加速度を伴う旋回運動時における4WSの運動性能は、タイヤ非線形領域ではコーナリングパワーの低下により十分な応答性が得られないことが報告されている⁽¹¹⁾。

このような、高い横加速度領域で効果が小さくなるという4WS制御の欠点を補うシステムとして、車両のヨーモーメントを直接制御する、左右駆動力制動力配分制御(DYC)が提案され実用化されている⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾。これにより旋回横加速度の限界付近における加速・減速時の挙動変化を低減させることができるようになった。

この手法はタイヤの制動力・駆動力差を用いて、車両のヨーモーメントを直接制御するので、加減速や旋回状態にかかわらず、タイヤに前後力発生余裕がある限り、所望のヨーモーメントが発生でき、限界領域においても操縦性安定性の向上が期待できる。さらに、島田ら⁽¹⁵⁾はDYCの効果を前後ロール剛性配分制御及び後輪舵角制御との比較をおこなっており、DYCが最も旋回運動時の加減速特性変化を補正できることを示している。また、横滑り防止技術の一つにベークルダイナミクスコントロール(VDC)があり、コーナリング限界領域で、左右どちらかの車輪に自動的にブレーキをかけ横滑りをコントロールしている⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。しかしながら、これらの技術は、コーナリング限界時のヨーイング挙動を安定化させる方向であり、DYCではコーナリング限界時の横加速度をコントロールすることは、タイヤ摩擦円の関係から限界がある⁽¹⁸⁾。

タイヤ特性におけるキャンバ角に対するキャンバスラスト力の関係について、小林ら⁽¹⁹⁾は実走行時の接地面の形状や圧力分布などのタイヤ接地特性について実験を行っている。タイヤのスリップ角の大きいコーナリング限界領域において、タイヤのキャンバ角をネガティブキャンバ角方向に傾けることで、横力の最大値が増加していることが示されてい

*¹ 交通機械工学科, *² 工学院大学機械システム工学科
平成27年12月1日受理

る。

一方、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。電気自動車においてはアクチュエータを用いて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。

そこで、コーナリング限界領域でアクチュエータを用いてタイヤのキャンバ角を大きく制御することで、コーナリング限界性能を向上できることが予想できたので、このタイヤ特性変化を利用した電気自動車の大キャンバ角コントロールの効果について検討を行なった。本研究ではモーメント法⁽²⁰⁾⁽²¹⁾を用いて限界領域でのキャンバ角制御の効果度合いを解析し、実用化されているDYCとの効果比較を行なった。その結果、キャンバ角制御はDYC以上の効果が期待できることを明らかにしたので報告する。

2. 記号

本論文で使用する主な記号を示す。

a, b	: Distance between the center of gravity and the front or rear wheels
F_f	: Front-wheel side force ($F_f = F_1 + F_2$)
F_r	: Rear-wheel side force ($F_r = F_3 + F_4$)
$T_{SA,1-4}$: Self-aligning torque of each wheel
M	: Restoring moment acting on the vehicle body
β	: Sideslip angle at the center of gravity
δ^*	: Front-wheel steer angle
W	: Vehicle weight
$W_1 \sim W_4$: Wheel load
μ	: Tire friction coefficient
G_f, G_r	: Roll rigidity of the front and rear wheels
G_f^*, G_r^*	: Distribution of roll rigidity between the front and rear wheels
h_f, h_r	: Roll center height of the front and rear wheels
h_g	: Height of the center of gravity
h_g^*	: Distance between the center of gravity and roll axis
t_f, t_r	: Front and rear wheel treads
W_f, W_r	: Front and rear wheel loads
Y_G, X_G	: Lateral and longitudinal acceleration (in units of gravitational acceleration g)
l	: Wheelbase
$\Delta T_f, \Delta T_r$: Front and rear wheel braking and drive force distribution

3. モーメント法による運動性能評価方法

3・1 モーメント法

タイヤ特性が非線形となる領域では線形領域と同様に車両の運動方程式を解析的に解くことはできない。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 β 、この拘束条件における前輪の操舵角を δ^* とする。前輪の横滑り角 β_1 、後輪の横滑り角 β_2 と、この β と δ^* 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 β_1 と β_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 β と δ^* と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により車両の運動特性全体が表現できる。図1の β は実走行時の後

輪の横滑り角に、 δ^* は前輪と後輪の横滑り角の「差」に対応する。図1の拘束条件において、車体に作用する4輪のサイドフォースの合計値 F は式3、復元モーメント M の値は式4となる。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 β_1, β_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。

$$F = F_f + F_r \tag{3}$$

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

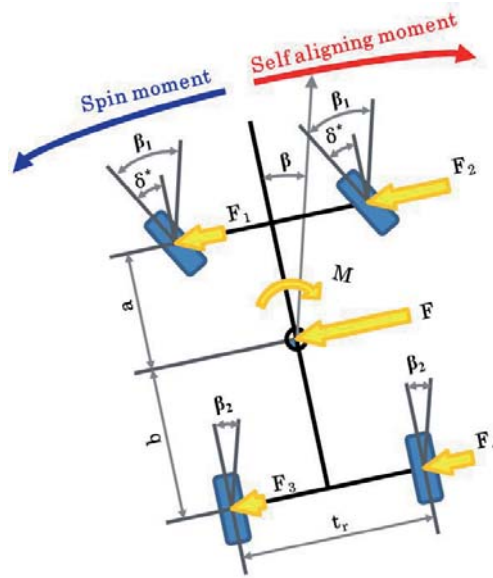


Fig.1 Vehicle model and analysis condition

3・2 荷重移動解析モデル

荷重移動は安部⁽²²⁾による準定常状態の考え方を採用した。図2に荷重移動の解析モデルを示す。旋回中の4輪の荷重は式(8)～(11)により表される。(ここでロール角・ピッチ角のsin成分により生じる重心点の前後・横移動量は無視している。)内外輪の横加速度に対する荷重移動特性を図3に示す。

$$G_f^* = \frac{G_f}{G_f + G_r} \tag{5}$$

$$G_r^* = \frac{G_r}{G_f + G_r} \tag{6}$$

$$h_g^* = h_g - \frac{h_f \cdot W_f + h_r \cdot W_r}{W} \tag{7}$$

$$W_1 = \frac{W_f}{2} - K_f \cdot Y_G - K_h \cdot X_G \tag{8}$$

$$W_2 = \frac{W_f}{2} + K_f \cdot Y_G - K_h \cdot X_G \tag{9}$$

$$W_3 = \frac{W_r}{2} - K_r \cdot Y_G + K_h \cdot X_G \tag{10}$$

$$W_4 = \frac{W_r}{2} + K_r \cdot Y_G + K_h \cdot X_G \tag{11}$$

$$K_f = \frac{G_f^* \cdot h_g^* \cdot W + h_f \cdot W_f}{t_f} \tag{12}$$

$$K_r = \frac{G_r^* \cdot h_g^* \cdot W + h_r \cdot W_r}{t_r} \tag{13}$$

$$K_h = \frac{1}{2} \frac{h_g}{l} W \tag{14}$$

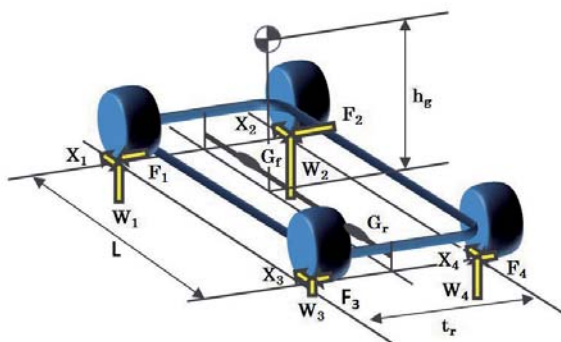


Fig.2 Model for the analysis of load distribution

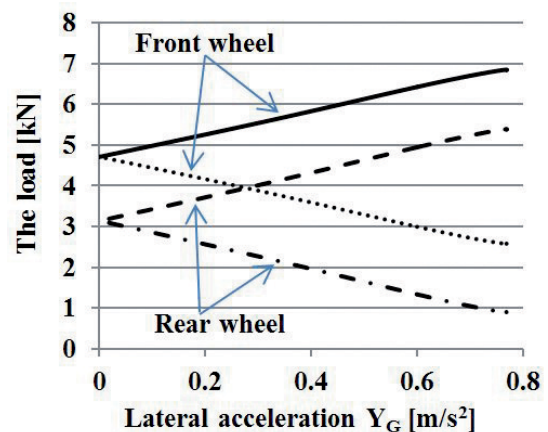


Fig.3 Tire load vs. lateral acceleration

3・3 左右駆動力制動力配分制御

前後輪の駆動力配分50：50の四輪駆動車において、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。タイヤのサイドフォースと駆動、制動力の間には摩擦円の関係が成り立ち、摩擦円の大きさは接地荷重に比例すると仮定する。タイヤの摩擦係数を μ とすると、前輪の制御可能な駆動、制動力 ΔT_f は内輪は式(15)外輪は式(16)、後輪の制御可能な駆動、制動力 ΔT_r は内輪は式(17)、外輪は式(18)により制限される⁽²²⁾。なお $\Delta T > 0$ を駆動力とする。

$$\left| \frac{m}{4} X_G - \Delta T_f \right| \leq \sqrt{(\mu W_1)^2 - \left(\frac{W_1}{W_1 + W_2} \frac{W_f}{g} Y_G \right)^2} \tag{15}$$

$$\left| \frac{m}{4} X_G + \Delta T_f \right| \leq \sqrt{(\mu W_2)^2 - \left(\frac{W_2}{W_1 + W_2} \frac{W_f}{g} Y_G \right)^2} \tag{16}$$

$$\left| \frac{m}{4} X_G - \Delta T_r \right| \leq \sqrt{(\mu W_3)^2 - \left(\frac{W_3}{W_3 + W_4} \frac{W_r}{g} Y_G \right)^2} \tag{17}$$

$$\left| \frac{m}{4} X_G + \Delta T_r \right| \leq \sqrt{(\mu W_4)^2 - \left(\frac{W_4}{W_3 + W_4} \frac{W_r}{g} Y_G \right)^2} \tag{18}$$

式(15) - (18)により得られる ΔT_f , ΔT_r にトレッドを乗じた復元ヨーモーメント M_{θ} , M_{τ} は以下のようになる。

$$M_{\theta} = -\Delta T_f \cdot t_f \tag{19}$$

$$M_{\tau} = -\Delta T_r \cdot t_r \tag{20}$$

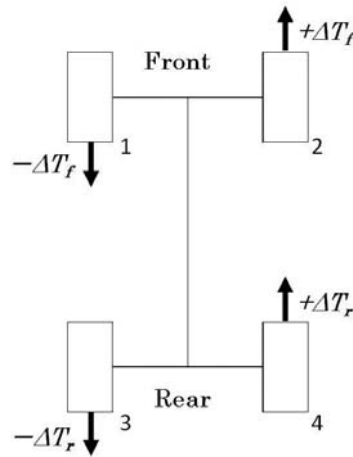


Fig.4 Braking and drive force distribution

3・4 キャンバ角制御

キャンバラストの効果を有効活用するため、タイヤはトレッド形状の丸いバルーンタイヤを使用した。ここで前輪実舵角 $\delta^* = 0$ のときの車体の横すべり角に対する前輪と後輪のサイドフォース特性は図5のようなになる。摩擦係数 μ は0.8とした。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ている。キャンバ角はアクチュエータにより変化させることとする。なお、タイヤモデルはマジックフォーミュラタイヤモデルを使用している⁽²³⁾。

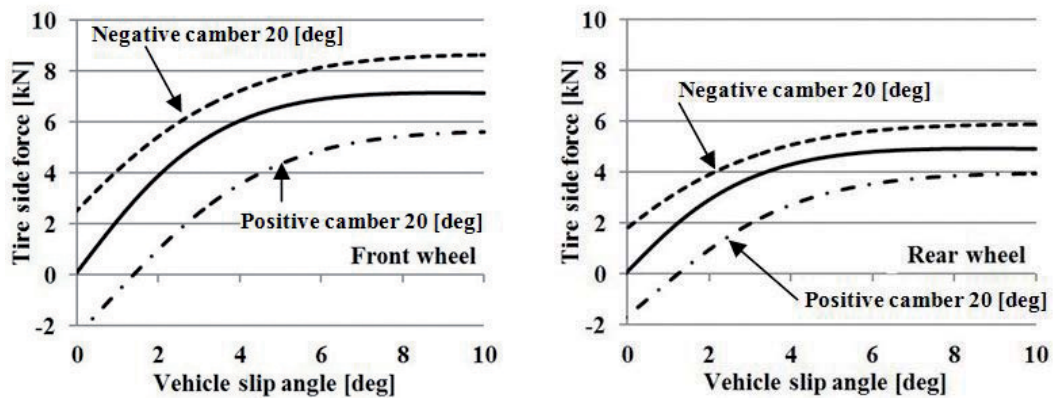


Fig.5 Front and rear wheel tire side force characteristics (Camber angle change)

3・5 計算条件

数値計算は表1に示すパラメータを用いておこなった。車両モデルは、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である。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、その領域を同一のグラフ上で比較検討する。

Table 1 Parameters used in calculation

Symbol	Value	Unit
$m = (W/g)$	1600	kg
G_f^*	0.48	—
G_r^*	0.52	—
h_f	0.046	m
h_r	0.05	m
h_g	0.52	m
t_f	1.47	m
t_r	1.459	m

4. 計算結果及び考察

図6に前輪実舵角 $\delta^* = 0$ の条件で解析した前輪の車体スリップ角に対する制駆動力限界線図, 横加速度に対する制駆動力限界線図を示す. さらに, ヨーモーメントの制御可能範囲を塗りつぶしにて示す. スリップ角, 及び旋回横加速度が増加するにつれてDYC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動力限界により生じていることがわかる. 図7に前輪実舵角 $\delta^* = 0$ の条件で解析した後輪の車体スリップ角に対する制駆動力限界線図, 横加速度に対する制駆動力限界線図を示す. 前輪の制駆動力限界線図に比べ, 後輪はヨーモーメントの制御幅が小さいが, これは解析に用いた車両の前後重量配分が60 : 40となっており, 後輪の摩擦円自体の大きさが小さくなっているからである. 図8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.

図9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る. 図8-(a)で示した左右駆動力制動力配分制御と比較すると車体スリップ角の小さい領域ではキャンバ角制御より左右駆動力制動力配分制御の方がヨーモーメントのコントロール幅が大きくなっている. しかし, 車体スリップ角の大きいコーナリング限界領域においてはキャンバ角制御の方が, 左右駆動力制動力配分制御より回頭側から復元側までのヨーモーメントのコントロール幅が広いことがわかる.

図10-図11は図5に示すタイヤ特性において, 前輪実舵角を変化させた時のキャンバ角制御の効果を比較したものである. 図10はキャンバ角を付けていない時の車両運動特性を表している. 図10-(a)においてヨーモーメントがゼロの場所は定常円旋回の状態を示す. 曲線がこの横軸より上にあるときは横すべり角を小さくする方向の復元モーメントが働き運動が安定し, 逆に横軸より下であれば横すべり角を大きくする方向にモーメントが作用し旋回を助長することになる. 定常円旋回の限界以上の横すべり角においては復元モーメントが発生しており, 定常円旋回が持続不可能となり, 前輪が先に限界に達して車両はプロ-状態となる. この関係を横加速度に対してグラフにしたものが図10-(b)である. 定常円旋回の限界横加速度以上の横加速度では復元モーメントが発生している.

図11は前輪対地ネガティブキャンバ角20度, 後輪対地ネガティブキャンバ角20度つけた時の計算結果である. 図11-(a)と図10-(a)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11-(b)と図10-(b)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.

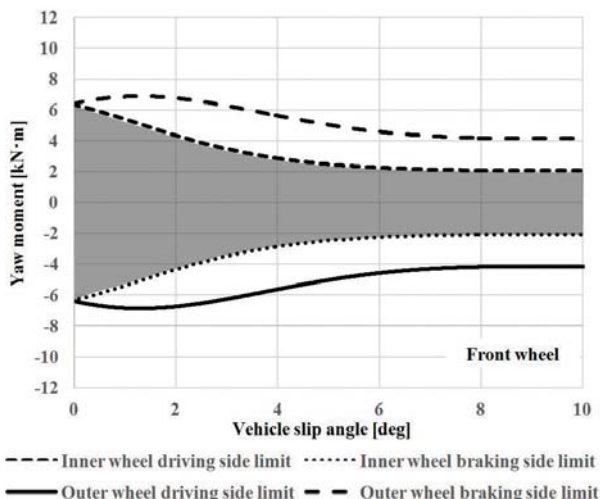


Fig. 6(a) β -yaw moment diagram (Front wheel DYC)

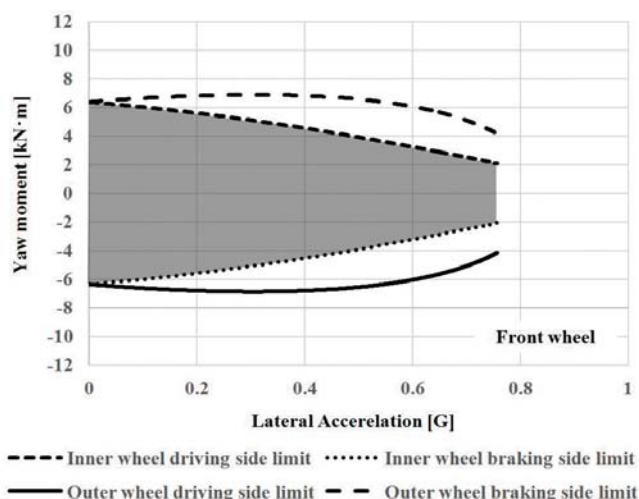


Fig.6(b) Y_c -yaw moment diagram (Front wheel DYC)

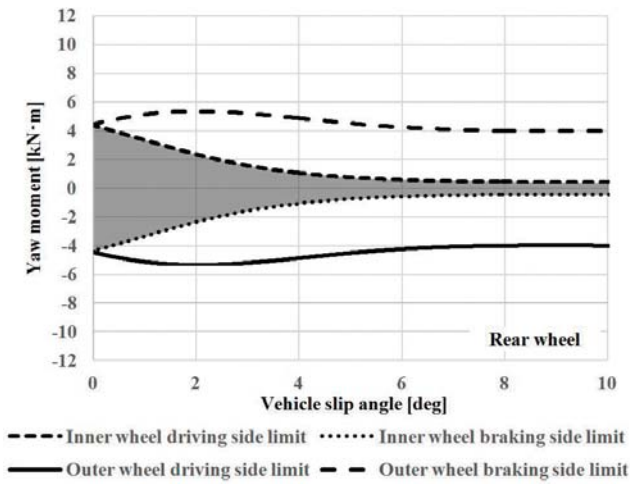


Fig.7-(a) β -yaw moment diagram (Rear wheel DYC)

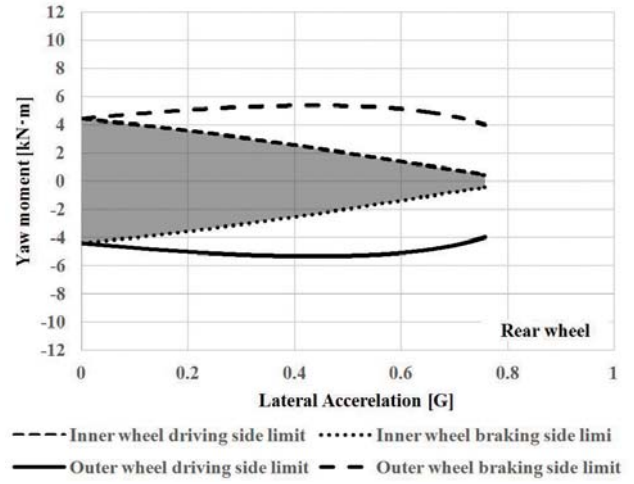


Fig.7-(b) Y_G -yaw moment diagram (Rear wheel DYC)

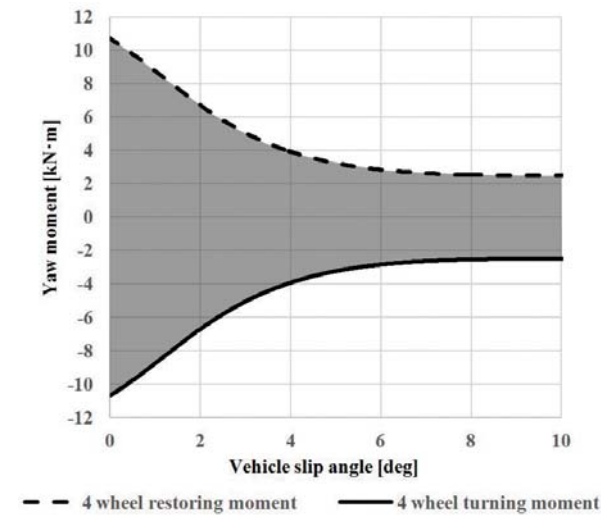


Fig.8-(a) β -yaw moment diagram

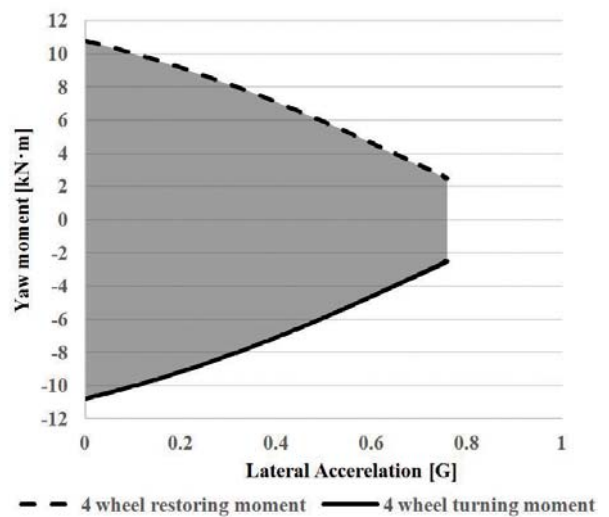


Fig.8-(b) Y_G -yaw moment diagram

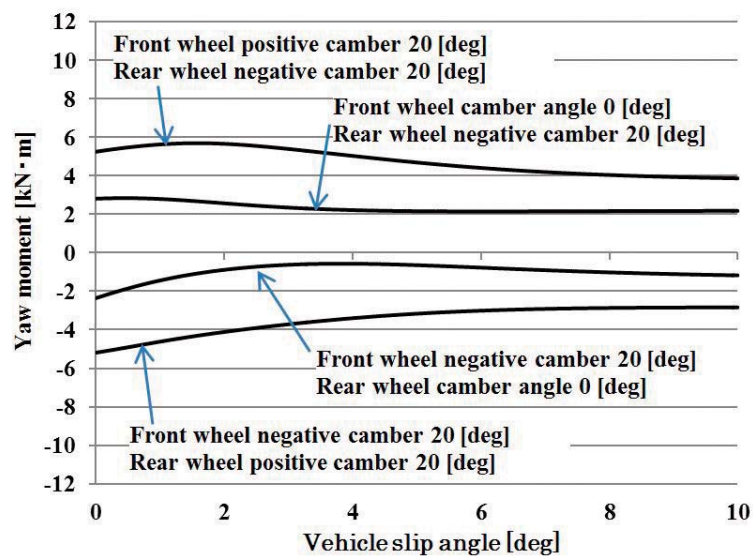


Fig.9 β -yaw moment diagram (Camber angle change)

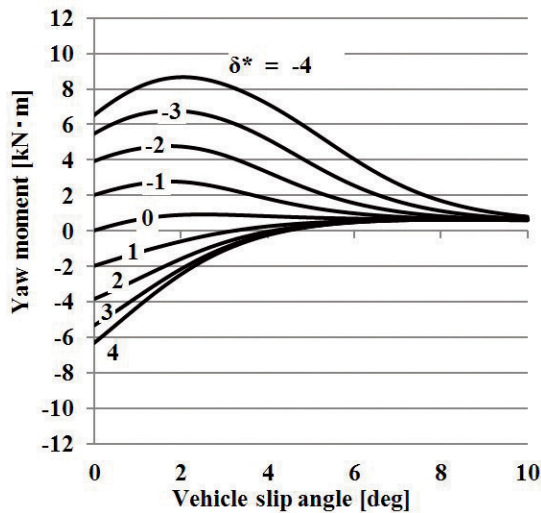


Fig.10(a) β -yaw moment diagram

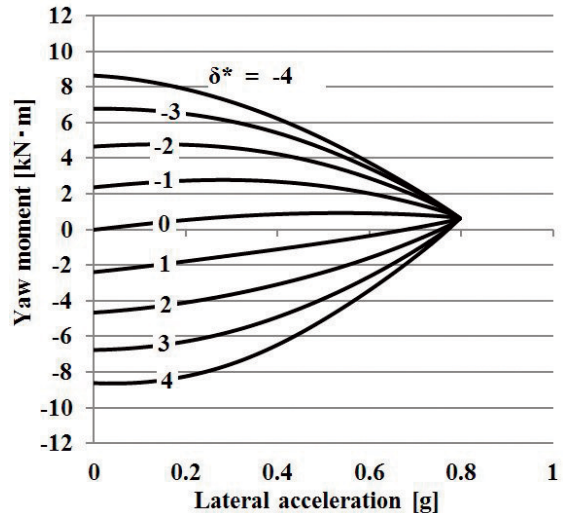


Fig.10(b) Y_G -yaw moment diagram

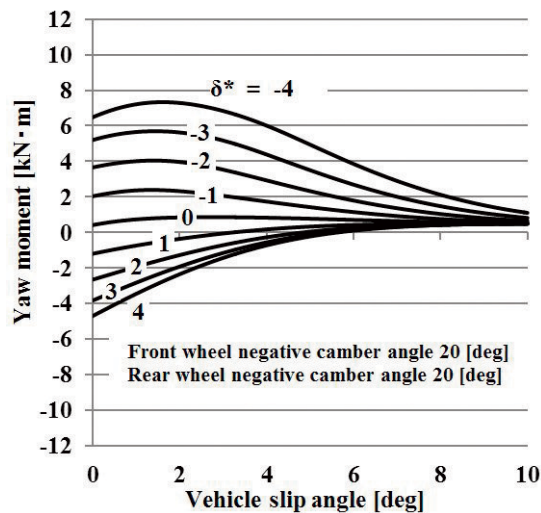


Fig.11(a) β -yaw moment diagram

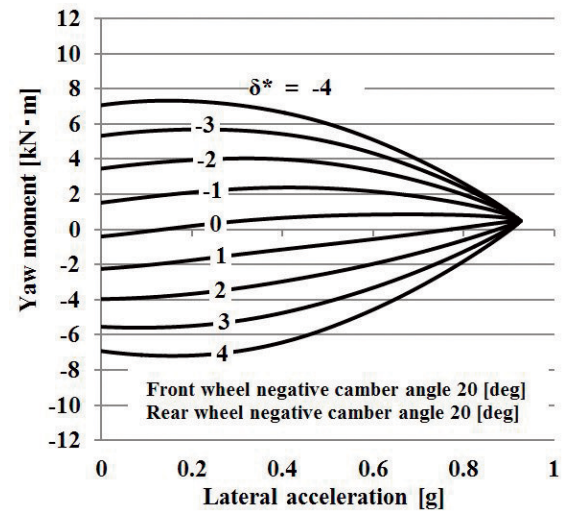


Fig.11(b) Y_G -yaw moment diagram

5. 結 語

本研究では、コーナリング限界領域でのコントロール手法としてキャンバ角制御に着目し、すでに実用化されている左右駆動力制動力配分制御との効果比較を行なった。種々の制御による影響をヨーモーメントに変換しモーメント線図を用いて効果度合いを比較した。その結果、コーナリング限界領域において、タイヤ摩擦円の観点から前後力の発生余裕が少なくなってしまう左右駆動力制動力配分制御は大スリップ角領域では制御幅が減少してしまう。しかしキャンバ角制御では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大きく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。本稿は静解析であり車両のダイナミクスを考慮したものではない。実際の制御則の開発は車両のダイナミクスを考慮して構築する必要があるが、その開発の指針を与えるものであるといえる。

文 献

(1) 金沢啓隆, 古谷茂樹, “四輪操舵による車両運動性能の向上”, 自動車技術, Vol. 39, No. 3 (1985), pp. 266-274.
 (2) 田中建, 中本正義, “マツダ車速感応型四輪操舵”, 自動車技術会シンポジウムテキスト「4WS車:アクティブ制御技術最前線」, (1987), pp. 253-258.

- (3) 古川修, “四輪操舵システムによる操安性の改善”, 自動車技術, Vol. 40, No. 3 (1986), pp. 290-296.
- (4) 入江南海雄, 芝端康二, “後輪アクティブ制御による操縦性安定性の向上”, 自動車技術, Vol. 40, No. 3(1986), pp. 360-369.
- (5) 吉田裕明, 西森政義, 三井剛, “四輪操舵車の操安性について”, 自動車技術, Vol. 41, No. 3 (1987), pp. 322-328.
- (6) 菅沢深, 入江南海雄, 黒木純輔, 福永由紀夫, 中村健治, “前後輪の操舵制御による操縦安定性向上”, 自動車技術会論文集, No. 38 (1988), pp. 62-70.
- (7) 森和典, 江口孝彰, 金子敏志, 川越健次, 入江南海雄, “サスペンション特性も考慮した後輪操舵の過渡制御による操安性向上”, 自動車技術会論文集, No. 45 (1990), pp. 31-36.
- (8) 森和典, 江口孝彰, 入江南海雄, “後輪操舵の過渡制御による操安性向上”, 自動車技術, Vol. 44, No. 3(1990), pp. 19-28.
- (9) 山本真規, 原田宏, 松尾芳明, “後輪のアクティブ操舵による操舵応答性・外乱安定性の向上”, 自動車技術会論文集, No. 46 (1990), pp. 56-61.
- (10) 横矢雄二, 小池伸, 岩田仁志, 河井弘之, “ヨーレートフィードバック式四輪操舵車の開発と実用化”, 自動車技術, Vol. 45, No. 10 (1991), pp. 47-52.
- (11) 安部正人, “旋回横加速度と前後加速度を考慮した前後輪アクティブ操舵車両の運動性能の解析”, 自動車技術会論文集, No. 43 (1990), pp. 103-107.
- (12) 芝端康二, 島田和彦, 泊辰弘, “ヨーモーメント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(1993), pp. 54-60.
- (13) 芝端康二, 栗城信晴, “左右駆動力配分システムの開発”, 自動車技術, Vol. 52, No. 4 (1998), pp. 79-86.
- (14) 森淳, 芝端康二, “ダイレクト・ヨー・コントロール AWD システムの開発”, 自動車技術会論文集, Vol. 38, No. 1(2007), pp. 15-20.
- (15) 島田和彦, 芝端康二, “ヨーモーメントによる車両運動制御方法の評価”, 自動車技術会論文集, Vol. 25, No. 3 (1994), pp. 122-127.
- (16) 井上浩一, 松野浩二, 新田亮, 桶渡穰, “新 4 WD 制御の開発”, 自動車技術会シンポジウムテキスト「動力伝達系の最新技術'98」, (1998), pp. 41-46.
- (17) 野崎博路, 基礎自動車工学, pp. 59-61, 東京電機大学出版局.
- (18) 福島直人, “車両の超旋回限界域における DYC 制御法に関する研究 第 1 報, 前置エンジン後輪駆動車への適用”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 70, No. 696 (2004), pp. 219-226.
- (19) 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 (2008), pp. 35-40.
- (20) Milliken, Jr, W. F., “The Static Directional Stability and Control of the Automobile”, *SAE Paper*, 760712 (1976).
- (21) T. Yoshino, H. Nozaki, “About the Effect of Camber Control on Vehicle Dynamics”, *SAE Paper*, 2014-01-2383 (2014).
- (22) 安部正人, “駆動や制動を伴う車両の円旋回の解析”, 自動車技術会論文集, No. 37 (1988), pp. 134-140.
- (23) 安部正人, 大沢洋, 自動車の運動性能向上技術 (2009), pp. 1-20, 朝倉書店.