

ブレーキ CBW システムを用いた、輪荷重比例型 ヨーレートフィードバック制動力配分制御

Wheel Load Proportional Yaw Rate Feedback Braking Force Distribution Control
with Control-by-Wire Brake System

稲垣 裕巳* 阿久澤 憲司* 佐藤 真実*
Hiromi Inagaki Kenji Akuzawa Makoto Sato

要 旨

4 輪の制動力を独立かつ自由に制御できるブレーキ CBW システムを用いて輪荷重比例型ヨーレートフィードバック制動力配分制御を行った。その結果、旋回制動性能が大幅に向上した。その制御内容と制御効果のシミュレーションによる解析、実験車によるテスト結果を報告するとともに、システムの概要を紹介する。

ABSTRACT

“Wheel load proportional yaw rate feedback braking force distribution control” was created with a control-by-wire (CBW) brake system which can control braking forces as desired on each of four wheels.

It was found that this braking force distribution control technique significantly improves the performance of the motor vehicle during cornering.

This paper reports the control technique and the results of a computer simulation and a proving-ground test on an experimental vehicle equipped with the control system. An outline of the proposed system is also introduced.

1. まえがき

近年、電子制御技術の進歩により車輛の高性能化が進んでいる。制動力制御の分野に於いても、ABS、トラクションコントロール等の電子制御デバイスが量産され、更に性能向上を目指して研究がなされている。

また、将来技術として自動運転、レーダーブレーキ等の研究も行われている。このような状況のなかで、今後、制動力制御システムに必要な技術課題として、

- 1) システムの統合化
- 2) 将来の自動ブレーキシステムの為のベース技術の確立
- 3) 車輛の旋回制動性能向上 (制動力とコーナリングフォースの干渉による、操舵特性の変化を防止する)

等が、挙げられる。

これらの技術課題に対応できる一手段として、4 輪の制動力を独立かつ自由にコントロールできるブレーキ CBW (control-by-wire) システムが考えられる。

ブレーキ CBW システムでは、直ちに自動運転、レーダーブレーキ等の自動ブレーキに対応出来るとともに、ABS、トラクションコントロールの機能も実現できることから、システムの統合化が容易である。またブレーキ CBW システムは、4 輪の制動力を独立かつ自由に制御できることから様々な新しい制御が可能である。

本研究では、ブレーキ CBW システムを用いて、4 輪の制動力を制御し、新しい制御形態である輪荷重比例型ヨーレートフィードバック制動力配分制御を行った。この結果、制動力による操舵特性の変化を防止して、車両の旋回制動性能を飛躍的に向上させることができた。

本稿では、今回試作したブレーキ CBW システムの概

* 栃木研究所

要および輪荷重比例型ヨーレートフィードバック制動力配分制御の内容と、シミュレーションによる制御システムの検討結果、実験車による旋回制動試験結果を報告する。

2. システムの概要

2.1. システムの構成

ブレーキCBWシステムの構成をFig. 1に示す。

本システムでは、制動力配分制御、ABS、トラクションコントロールの機能を、同時に行える構成としている。

搭載されているセンサは、制御系に使用するものと、フェールセーフに使用するものとに大別される。

制御系に使用するセンサには、車両状態を検出するセンサとして、前後加速度センサ、横加速度センサ、ヨーレートセンサ、車輪速センサ、ドライバの意志を検出するセンサとしては、舵角センサ、踏力センサがある。尚、車輪速センサは、ドライバの意志を検出するセンサとしても使用している。

各ホイールシリンダの圧力を検出している圧力センサは、フェールセーフの為に付加している。

ブレーキCBWシステムのコンピュータユニットは、センサ信号に応じて各制御の演算を実行し、4輪のホ

イールシリンダ圧を決定してこの圧力に相当する電流をブレーキアクチュエータに出力する。ブレーキアクチュエータは、入力された電流に比例した圧力をホイールシリンダに発生させる。

2.2. 油圧システム

ブレーキCBWの油圧システムをFig. 2に示す。

ブレーキアクチュエータとしては、制動フィーリング等を考慮して圧力がなめらかにコントロールできるリニアソレノイドとスプールバルブによる電磁サーボ弁 (Linear Solenoid Spool Valves) を採用した。ブレーキアクチュエータの周波数応答特性をFig. 3に示す。本ブレーキアクチュエータの応答性は、ABS、トラクションコントロールの制御も十分行える性能を示している。

次に、本油圧システムは、パワーソース、制御システム、アクチュエータ等が故障した場合、CBWシステムの制御を停止し、マスターシリンダとホイールシリンダを直結し、ブレーキペダルで直接制動力が発生できる状態に即座に切り替えるフェールセーフバルブを備えている。また、ペダル踏力とペダルストロークの関係を自由に設定可能な機構とする為に、可変容量型のストロークアキュムレータを設けている。

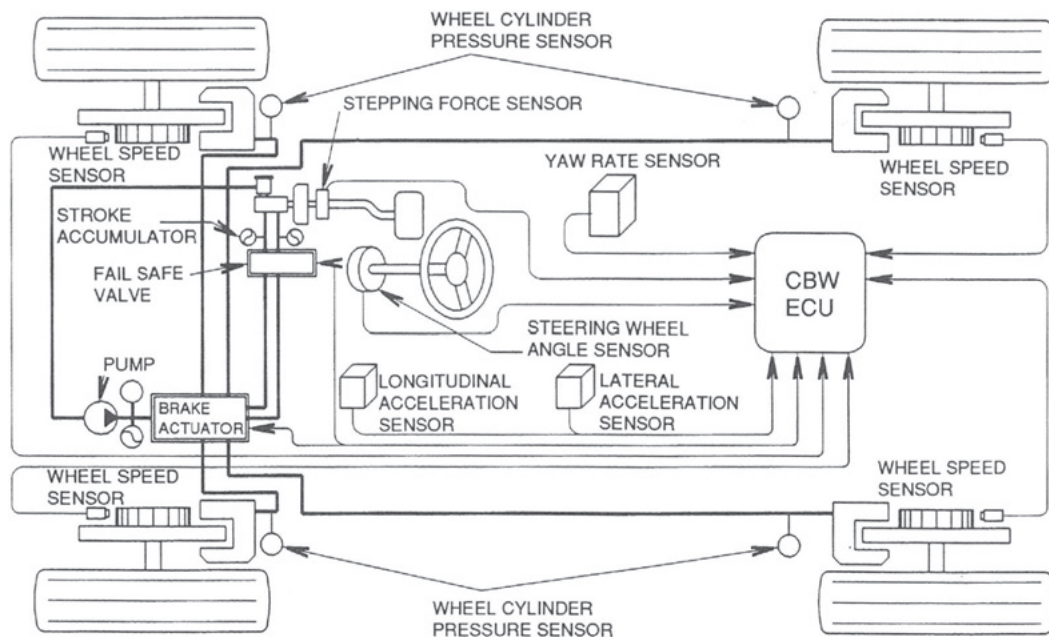


Fig. 1 Control-by-Wire Brake System Construction

3. シミュレーションによる制動力配分制御手法の検討

旋回制動時には、後輪から前輪、内輪から外輪へ荷重移動が発生し接地荷重が変化する。この時タイヤの発生できる制動力の限界は、タイヤと路面の間の摩擦係数と接地荷重に依存することから、4 輪の接地荷重に応じた制動力配分制御が、旋回制動性能の向上に対して有効であると予想される。

そこで車体 6 自由度、1 車輪 4 自由度のシミュレーションモデルを用いて一定の旋回条件のもとで減速度、ヨーレート、制動時の車輛軌跡を評価指標とし制御手法を検討した。本シミュレーションモデルと構成を Fig. 4 に示し、シミュレーションモデルに用いた車両の諸元を Table 1 に示す。

Table 1 Vehicle Specifications

Wheelbase		2.91(M)
Tread	Front	1.55(M)
	Rear	1.54(M)
Wheel Load	Front axle	$1 \times 10^4(N)$
	Rear axle	$6 \times 10^3(N)$
Height of center of gravity		0.55(M)

3.1. シミュレーションモデルの検証

シミュレーションモデルを検証する意味で、まず、制動力の左右アンバランスにより車体に発生するヨーレートの時間的経過を前片輪、後片輪、片側前後輪だけにブレーキをかける 3 パターンで実車試験を行ない、シミュレーションと試験データの比較を行った。実車試験の方法は、舵角直進固定、踏力は最大値まで 2 秒で到達するランプ入力とした。シミュレーションも同じ条件で行

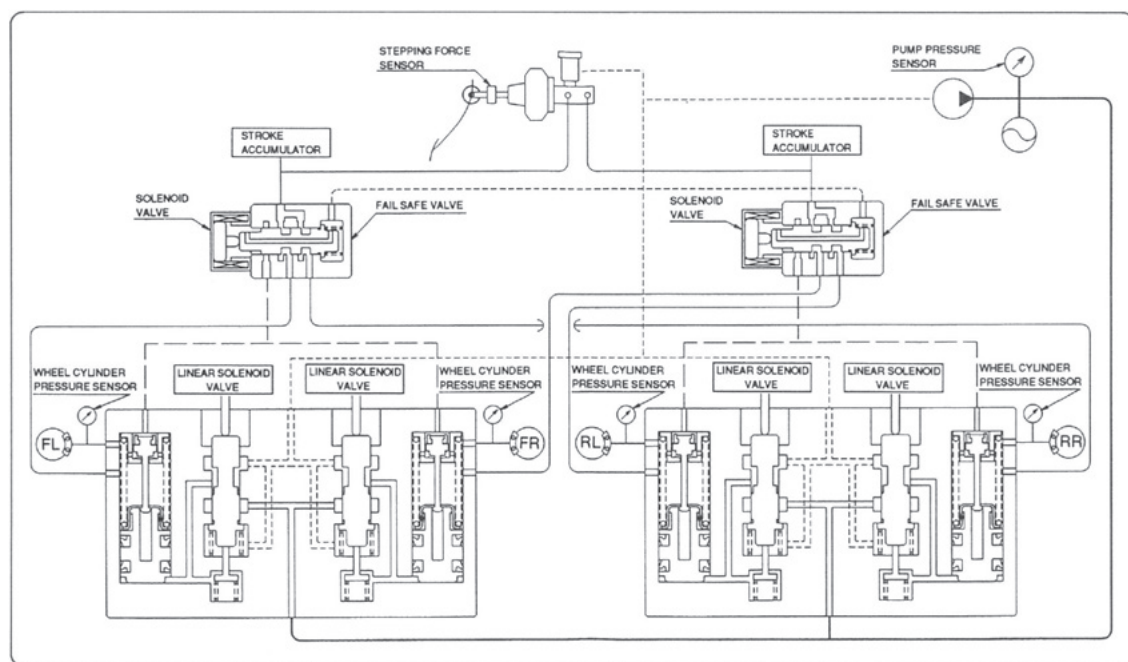


Fig. 2 Hydraulic System

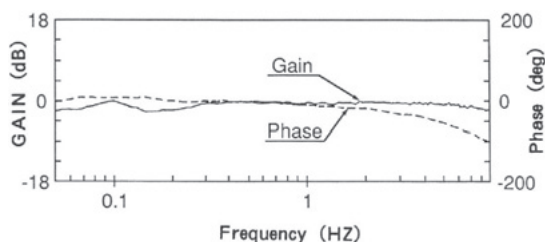


Fig. 3 Frequency Response of the Brake Actuator

なっている。その結果を Fig. 5 に示す。

3 パターンは制動力の合計が等しいにもかかわらず発生ヨーレートに違いが認められる。その原因は、後輪に制動力を発生させた場合、荷重移動による後輪の接地荷重の減少と相まって、車両を安定させる後輪のコーナリングフォースが著しく減少する為である。実車データとシミュレーション結果は、この現象についてよく一致し

ており、解析及び制御の検討にも本シミュレーションを利用できると判断できる。

3.2. 制御手法の検討

制動力配分制御の考え方として

I. 旋回制動時に於いても最大の制動力が得られること

II. 制動力により操舵特性が変化しないこと

以上二つの考え方をもとに制御手法を検討した。

3.2.1. 輪荷重比例配分制御

I の考え方を実現するには、4 輪のタイヤの接地荷重に比例した制動力配分を行うことが適切であると予想される。

そこで、まずブレーキペダル踏力に対する目標減速度 (G_r) を設定し、この目標減速度を得るために必要な、車両制動力 (F) を次式で求める。

$$F = M \cdot G_r \quad M: \text{車体質量}$$

次に前後加速度と、横加速度で 4 輪の荷重を求め配分率を決定し、車両制動力をその配分率で配分する。

初期の輪荷重に前後加速度による荷重移動分を加えると以下ようになる。

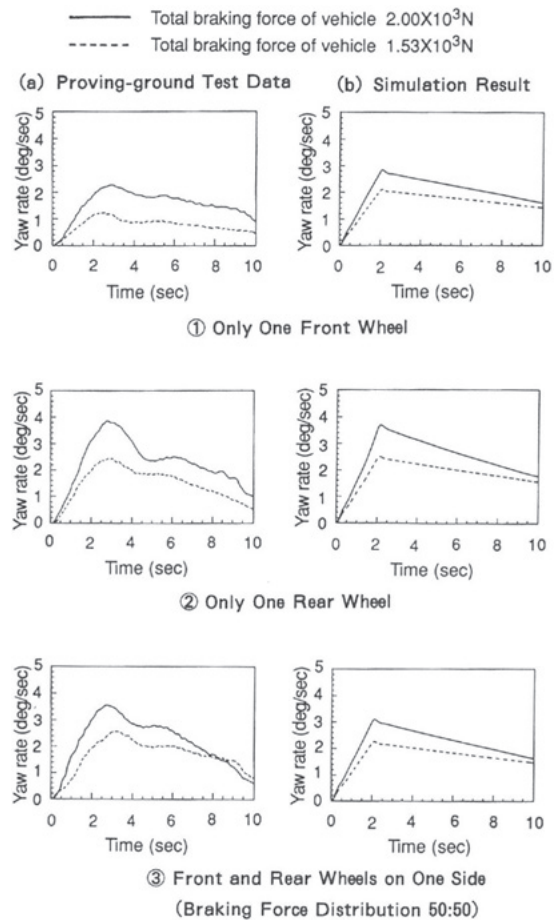


Fig. 5 Yaw Rate Resulting from Braking Force

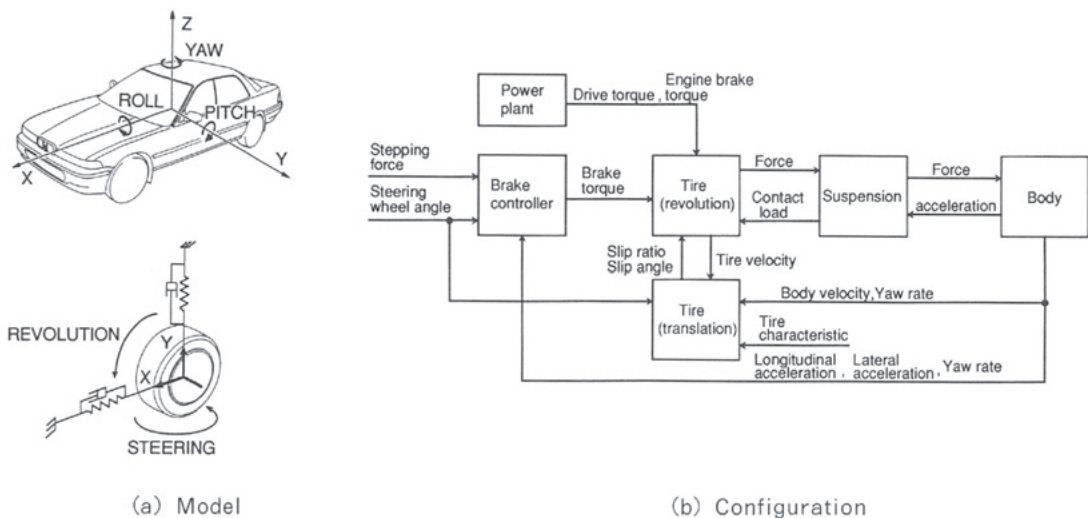


Fig. 4 Simulation Model

$$\begin{aligned} W_{fr} &= W_{frb} + (W_{frb} + W_{rrb}) \cdot \frac{h \cdot G_x}{l \cdot g} \\ W_{fl} &= W_{flb} + (W_{flb} + W_{rlb}) \cdot \frac{h \cdot G_x}{l \cdot g} \\ W_{rr} &= W_{rrb} - (W_{frb} + W_{rrb}) \cdot \frac{h \cdot G_x}{l \cdot g} \\ W_{rl} &= W_{rlb} - (W_{flb} + W_{rlb}) \cdot \frac{h \cdot G_x}{l \cdot g} \end{aligned}$$

次に横加速度による荷重移動分を加えると

$$\begin{aligned} W'_{fr} &= W_{fr} - (W_{fr} + W_{fl}) \cdot \frac{h \cdot G_y}{t_f \cdot g} \\ W'_{fl} &= W_{fl} + (W_{fr} + W_{fl}) \cdot \frac{h \cdot G_y}{t_f \cdot g} \\ W'_{rr} &= W_{rr} - (W_{rr} + W_{rl}) \cdot \frac{h \cdot G_y}{t_r \cdot g} \\ W'_{rl} &= W_{rl} + (W_{rr} + W_{rl}) \cdot \frac{h \cdot G_y}{t_r \cdot g} \end{aligned}$$

となる。よって、4 輪の配分率は、

$$\begin{aligned} R_{fr} &= W'_{fr}/W \\ R_{fl} &= W'_{fl}/W \\ R_{rr} &= W'_{rr}/W \\ R_{rl} &= W'_{rl}/W \end{aligned}$$

となり、4 輪それぞれの制動力は、

$$\begin{aligned} F_{fr} &= F \cdot R_{fr} \\ F_{fl} &= F \cdot R_{fl} \\ F_{rr} &= F \cdot R_{rr} \\ F_{rl} &= F \cdot R_{rl} \end{aligned}$$

として求められる。

この輪荷重比例配分制御で、どの程度、操舵特性が改善されるかを、シミュレーションにより確認した。

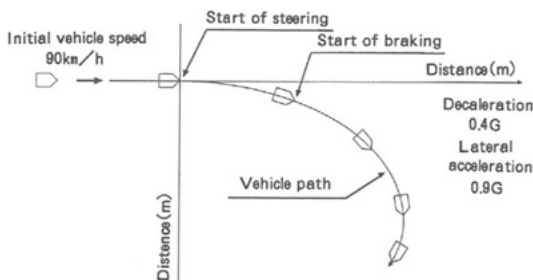


Fig. 6 The Brake Performance Test of the Motor Vehicle During Cornering

操舵特性変化の評価指標は、非制動時の操舵応答特性に基づいて設定した規範ヨーレートに対する実ヨーレートの追従性とした。操舵応答特性は、乾燥路で操舵応答試験を行ない、測定データをもとに関数同定により2次の伝達関数として求めている。

以後、旋回制動性能の評価方法として採用している走行パターンを Fig. 6 に示す。

Fig. 7 は、この旋回制動条件のもとで、プロポーションングコントロールバルブ(PCV)のみ付加した制動力特性のもの(市販車と同等)と、輪荷重比例配分制御のもとで、旋回制動時の実ヨーレートと規範ヨーレートの時間的経過のシミュレーションによる比較である。

輪荷重比例配分制御のものは、市販車レベルのものに対し、圧倒的に規範ヨーレートと実ヨーレートとの差は少なくなっているが、まだ、十分追従しているとは言えない。

3.2.2. 輪荷重比例型ヨーレートフィードバック制御

制動力による操舵特性の変化を更に小さくする為に、輪荷重比例配分制御をおこなったものに対し更にヨーレートフィードバック制御による補正を試みた。ヨーレートフィードバック制御は、規範ヨーレートと実ヨーレートとの偏差に基づくPID 制御とした。PID 演算結果 $u(t)$ に補正係数 $K(t)$ を乗じたものをヨーレートフィードバック制御で補正する制動力とした。以後、この制動力を補正制動力と呼ぶ。即ち、補正制動力は、

$$F_y = K(t) \cdot u(t)$$

となる。ここで補正係数 $K(t)$ は、後で論じられるヨーレートフィードバック制御の制御範囲に応じて随時決定

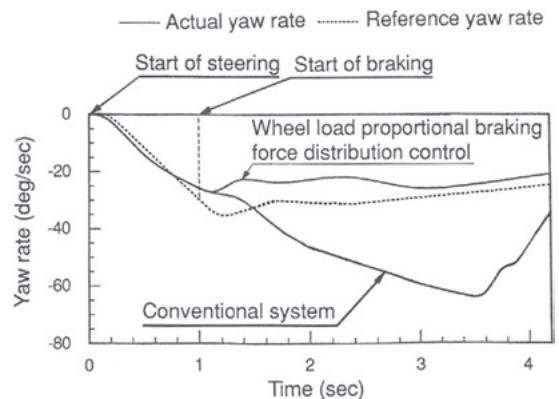


Fig. 7 Reference and Actual yaw Rate of Braking in Turning (Condition Same as Fig. 6)

される変数である。

この補正制動力によって制動力の左右配分を補正して実ヨーレートを制御する。この補正制動力は、前後輪両方に対して配分すると実ヨーレートを制御できる範囲が広く取れ効果的である。

また、補正制動力によって車輛の減速度が変化することを防止する為、4輪合計の制動力は制御によって変化しない様にし、制動力配分のみを可変にしている。

更に、補正制動力の前輪と後輪への配分は、制動効率を考慮して、輪荷重に比例した配分とする。

以上より、4輪それぞれの制動力は、

$$F'_{fr} = F \cdot R_{fr} + F_y \cdot \frac{R_{fr}}{R_{fr} + R_{rr}}$$

$$F'_{fl} = F \cdot R_{fl} - F_y \cdot \frac{R_{fl}}{R_{fl} + R_{rl}}$$

$$F'_{rr} = F \cdot R_{rr} + F_y \cdot \frac{R_{rr}}{R_{fr} + R_{rr}}$$

$$F'_{rl} = F \cdot R_{rl} - F_y \cdot \frac{R_{rl}}{R_{fl} + R_{rl}}$$

となる。

Fig. 8は、輪荷重比例型ヨーレートフィードバック制御と輪荷重比例配分制御の、旋回制動時における、実ヨーレートと規範ヨーレート、車輛軌跡のシミュレーションによる比較である。

輪荷重比例型ヨーレートフィードバック制御は、輪荷重比例配分制御よりも更に規範ヨーレートに対する追従性が向上している。停止位置、停止方向についても、規範ヨーレートによる走行軌跡を基準として、ほぼ基準上に停止し停止方向も接線方向になっている。つまり操安性が更に改善された結果と言える。

3.2.3. 輪荷重比例型ヨーレートフィードバック制御の最大減速度

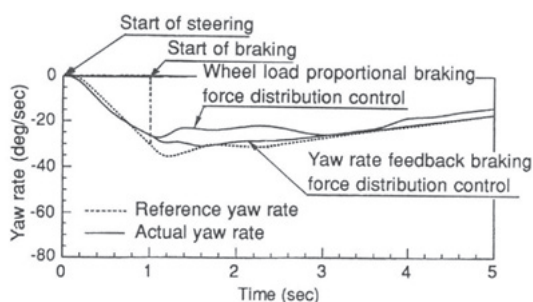
ヨーレートフィードバック制御を付加すると輪荷重に比例した配分率がくずれる為、最大減速度が低下するのではないかと懸念がある。そこで、輪荷重比例型ヨーレートフィードバック制御の場合と輪荷重比例配分制御とで横加速度(旋回中の求心加速度)に対する最大減速度の比較を行った。

走行条件は、進入速度 60km/h と 100km/h、舵角は、10度から 100度までのいくつかのケースについて、各々約 1秒のランプ入力とし、ブレーキは、ステア操作開始

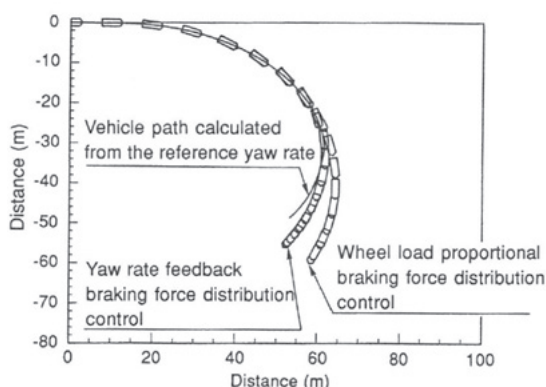
後 1秒の時点(操作終了直後)から開始し、1秒でほぼ最大油圧を発生するランプ入力とした。最大減速度は、少なくとも 1輪ロックが発生した時の減速度として定義した。

上記走行条件において、最大減速度が発生するまでの横加速度と減速度の変化を Fig. 9 に示す。また舵角による横加速度の変化に対して、最大減速度が、輪荷重比例型ヨーレートフィードバック制御の場合と輪荷重比例配分制御の場合とでどうなるかを、Fig. 10 に示す。

Fig. 10 から、輪荷重比例型ヨーレートフィードバック制御の場合でも、最大減速度は殆ど低下しないことが確認された。



(a) Reference and Actual Yaw Rate of Braking in Turning



(b) Vehicle Path During Braking

Fig. 8 Vehicle Path and Yaw Rate During Braking in Turning in the Case of the Yaw Rate Feedback Braking Force Distribution Control and of the Wheel Load Proportional Braking Force Distribution Control
(Condition: Same as Fig. 6)

3.2.4. 輪荷重比例型ヨーレートフィードバック制御の制御範囲

ヨーモーメントを制御する為に使用できる制動力の最大は、車輪の接地荷重と、タイヤと路面の摩擦係数の2つの要素により決定される最大制動力から、輪荷重により決定した制動力を減じた制動力になる。この制動力を以後「余裕制動力」と呼ぶことにする。

ドライバが最大減速度を望むような場合や、旋回制動時の横加速度が大きい場合は、余裕制動力が少なくなることから、発生できるヨーモーメントも同時に少なくな

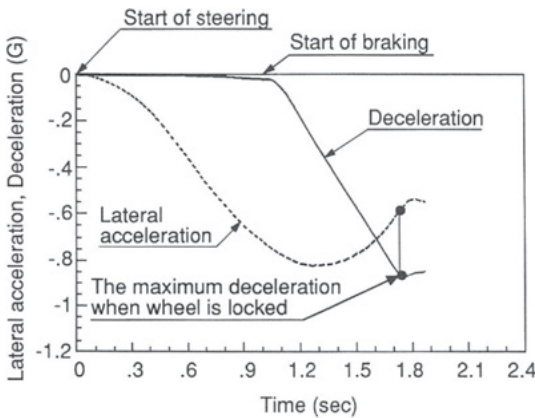


Fig. 9 The Maximum Deceleration of Braking in Turning
(Conditions: Initial Vehicle Speed 60, 100km/h, Input Steering Angle 10 ~ 100 degree)

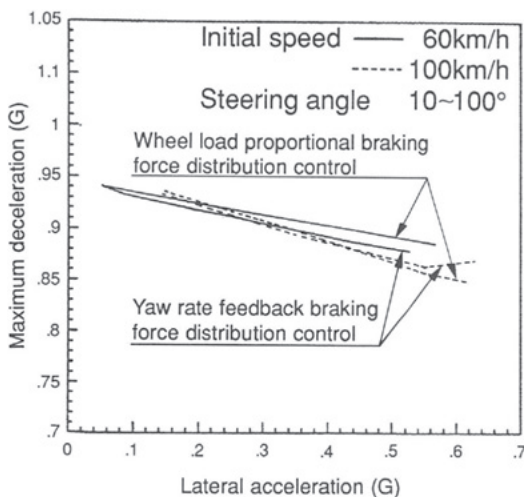


Fig. 10 Maximum Deceleration to the Lateral Acceleration in the Case of the Wheel Load Proportional Braking Force Distribution Control and of the Yaw Rate Feedback Braking Force Distribution Control

り、制御範囲も限定されることになる。

ここで、制御範囲は制動力によって発生できるヨーモーメントの大きさに定義することにする。この時、タイヤと路面の摩擦係数は1として、制御範囲を検討した。

旋回制動時に各輪の制動力が Fig. 11 のような関係になっているとすると、各輪の余裕制動力は、

$$F_{sfr} = F_{frmax} - F_{fr}$$

$$F_{sfl} = F_{flmax} - F_{fl}$$

$$F_{srr} = F_{rrmax} - F_{rr}$$

$$F_{srl} = F_{rlmax} - F_{rl}$$

となる。

ヨーレートを減少させる方向に制御する場合は、外輪(図左側)の制動力を増加させる。増加させることのできる最大の制動力は、外輪の余裕制動力の和となる。

また、同時に、内輪(図右側)から制動力を減少させる。減少させることのできる最大の制動力は、輪荷重により決定された制動力の和となる。

ここで、増加させる制動力と減少させる制動力が等しいことから、補正制動力の最大は、

$$F_{ymax} = \text{MIN} \{ (F_{sfl} + F_{srl}), (F_{fr} + F_{rr}) \}$$

となる。

同様に、ヨーレートを増加させる方向に制御する場合、補正制動力の最大は、

$$F_{ymax} = \text{MIN} \{ (F_{fl} + F_{rl}), (F_{sfr} + F_{srr}) \}$$

となる。ここで MIN(A, B) は A, B の小さい方を表す。

よって、発生できるヨーモーメントの最大値 T_{max}

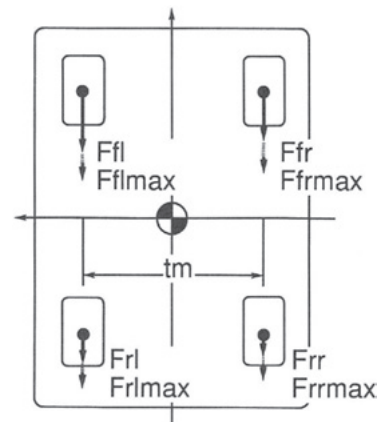


Fig. 11 The Braking Force for Each Wheel of Braking in Turning

は、

$$T_{\max} = 2 \cdot F_{y\max} \cdot t_m / 2$$

となる。 t_m は、前後トレッドの平均値。 T_{max} の大きさは、そのままヨーコントロールに対する制御範囲の大きさを示していると考えられる。

この T_{max} を横加速度と減速度の関数として求めると、Fig. 12 のようになる。Fig. 12 から T_{max} は、ヨーレートを増加させる制御の場合も、減少させる制御の場合も、横加速度に対しては小さい領域によるほど大きくなり、減速度に対しては中間付近で最大となる。この領域ではヨーコントロールの制御範囲が大きい事がわかる。減速度、横加速度が大きい場合は、 T_{max} は殆どゼロになり、ヨーコントロールの制御範囲が残されていない。

この結果を、先に述べたヨーレートフィードバックの補正制動力 F_y を求める式の補正係数 K の値に反映すると、最適なヨーレートフィードバック制御が実現される。

以上の検討結果より、本システムの輪荷重比例型ヨーレートフィードバック制御は制動効率、操安性ともに優れた制御方式であることがわかる。

その制御ブロック図を Fig. 13 に示す。

4. 実車試験結果

Fig. 13 で示した制御を用いて、オープンループの旋回制動試験を実施した。

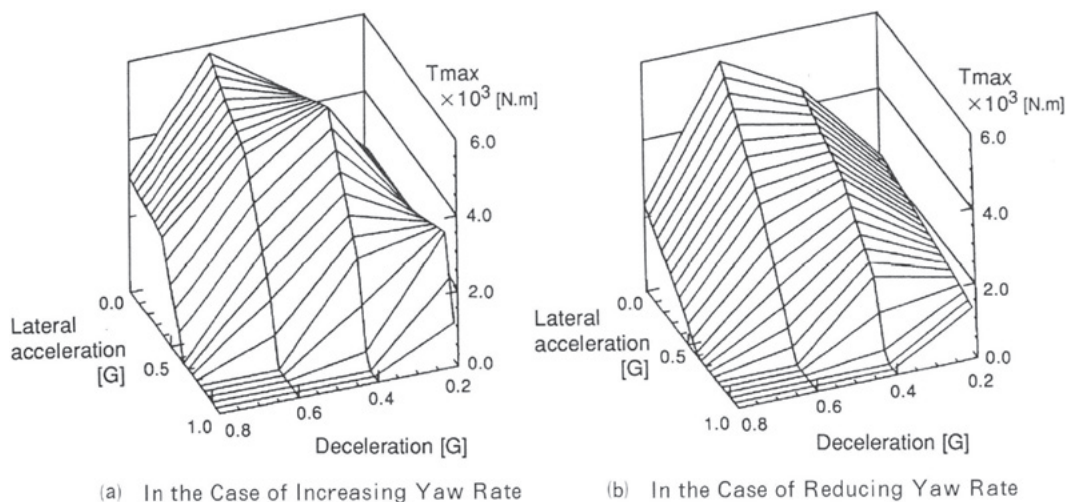


Fig. 12 Relation between Deceleration/Lateral Acceleration and Tmax

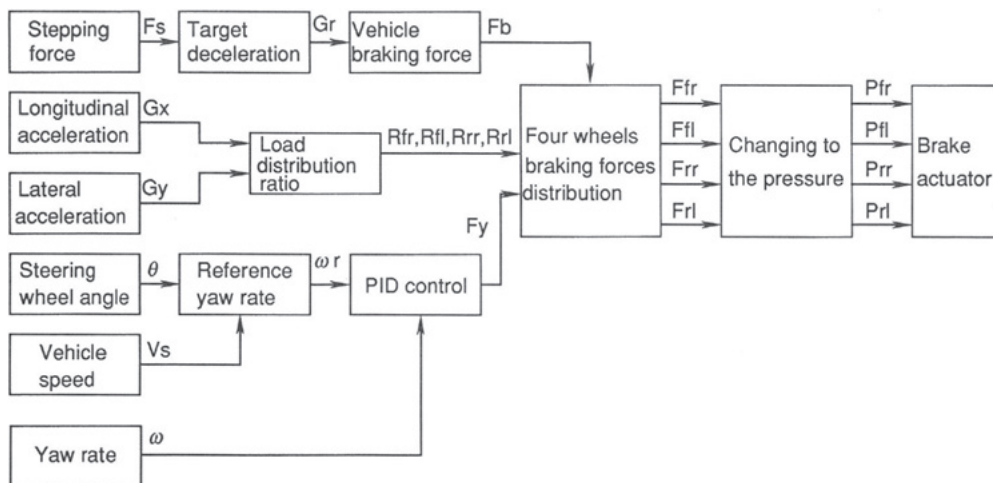


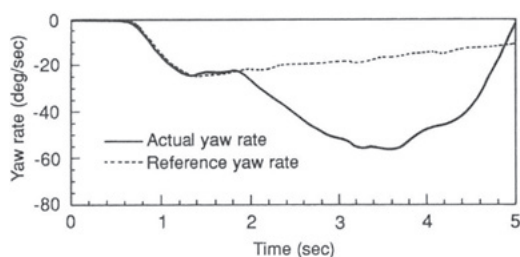
Fig. 13 Control Diagram for Yaw Rate Feedback Braking Force Distribution Control

制御の効果を明確にする為 ABS は不作動とした。性能比較は、同一車両で PCV のみ付加した制動力特性のものとで行った。

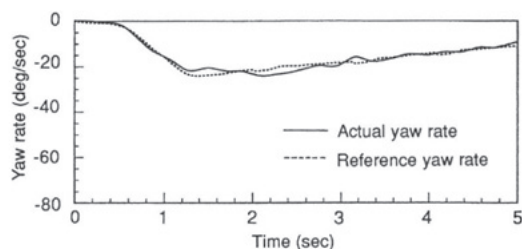
本実車試験に使用した車両の諸元は、シミュレーションに使用したものと同一である。この試験結果を Fig. 14 に示す。制御を行ったものは、車両の実ヨーレートが規範ヨーレートによく追従しているのがわかる。

旋回制動時には後輪から前輪へ、内輪から外輪へ荷重

移動が発生し、これに伴い制御により、後輪より前輪へ、内輪より外輪へ多くの制動力が配分される。この結果、前内輪のヨーレートを増加させる方向の制動力と、後内輪のコーナリングフォースの減少を誘発する制動力が抑えられ、反対に前後両外輪のヨーレートを減少させる方向の制動力は増加し、4 輪合計のヨーモーメントがヨーレートを減少させる方向に制御され、車両のヨーレートが規範ヨーレートに近づいたことが確認される。



(a) Braking Characteristics of Conventional System with PCV



(b) Yaw Rate Feedback Braking Force Distribution Control

Fig. 14 Results of Brake Test in Turning (Conditions: Initial Vehicle Speed 90km/h, Deceleration 0.4G, Lateral Acceleration 0.8G)

5. 結 論

本稿では、ブレーキ CBW システムの内容と輪荷重比例型ヨーレートフィードバック制動力配分制御の内容について述べた。以下にその内容をまとめる。

- 1) ABS、トラクションコントロール、自動ブレーキシステムとの統合化を CBW システムにより構成可能とした。
- 2) 制動力の配分制御の有効性をシミュレーションを用いて確認した。
- 3) 本稿で紹介した輪荷重比例型ヨーレートフィードバック制動力配分制御は旋回制動性能を大幅に向上させることを実車テストで確認した。

記号一覧表

F : 車両制動力
W : 車両重量
g : 重力加速度
Gr : 目標減速度

W_{frb} : 前輪右側の初期接地荷重
W_{flb} : 前輪左側の初期接地荷重
W_{rrb} : 後輪右側の初期接地荷重
W_{rlb} : 後輪左側の初期接地荷重
W_{fr} : 前後加速度による荷重移動後の前輪右側の接地荷重
W_{fl} : 前後加速度による荷重移動後の前輪左側の接地荷重
W_{rr} : 前後加速度による荷重移動後の後輪右側の接地荷重
W_{rl} : 前後加速度による荷重移動後の後輪左側の接地荷重
W'_{fr} : 前後加速度と横加速度による荷重移動後の前輪右側の接地荷重
W'_{fl} : 前後加速度と横加速度による荷重移動後の前輪左側の接地荷重
W'_{rr} : 前後加速度と横加速度による荷重移動後の後輪右側の接地荷重
W'_{rl} : 前後加速度と横加速度による荷重移動後の後輪左側の接地荷重

h	: 重心高
l	: ホイールベース
tf	: 前輪側のトレッド
tr	: 後輪側のトレッド
tm	: 前後トレッドの平均
Gx	: 前後加速度
Gy	: 横加速度
Rfr	: 前輪右側の制動力配分率
Rfl	: 前輪左側の制動力配分率
Rrr	: 後輪右側の制動力配分率
Rrl	: 後輪左側の制動力配分率
Ffr	: 前輪右側の制動力
Ffl	: 前輪左側の制動力
Frr	: 後輪右側の制動力
Frl	: 後輪左側の制動力
F'fr	: 前輪右側の補正後制動力
F'fl	: 前輪左側の補正後制動力
F'rr	: 後輪右側の補正後制動力
F'rl	: 後輪左側の補正後制動力
Fy	: 補正制動力
K(t)	: 補正制動力の変換定数
U(t)	: PID 演算結果
Tmax	: 制御により発生できる最大ヨーモーメント
Fymax	: 最大補正制動力
Ffrmax	: 前輪右側の最大制動力
Fflmax	: 前輪左側の最大制動力
Frrmax	: 後輪右側の最大制動力
Frlmax	: 後輪左側の最大制動力
Fsfr	: 前輪右側の余裕制動力

Fsfl	: 前輪左側の余裕制動力
Fsrr	: 後輪右側の余裕制動力
Fsrl	: 後輪左側の余裕制動力

参考文献

- 1) 中村、中村、佐藤: 制動力配分に関する一考察、自動車技術 Vol.31 No.3 1977
- 2) 小笠原、村田: 旋回時の制動性能について、自動車技術 Vol.41 No.3 1987
- 3) 中山、川畑、白井: リニア油圧制御 ABS の開発、自動車技術会学術講演会前刷集 912280 1991-10
- 4) 阿部: タイヤ負担の均一化と車両運動性能について、自動車技術会シンポジウム〔タイヤ性能－理論と応用〕 1992
- 5) G. Buschmann, H. T. Ebner, W. Kuhn: Electronic Brake Force Distribution Control - A Sophisticated Addition to ABS, SAE paper No.920646 1992
- 6) 井上、山口、松本、安野: 制動力配分制御による車両運動性能の向上、自動車技術会学術講演会前刷集 921035 1992-5
- 7) 稲垣、阿久澤、佐藤: Yaw Rate Feedback Braking Force Distribution Control with Control-by-Wire Brake System AVEC '92 1992-9
- 8) 景山: ニューラルネットワークを用いたタイヤの負荷率制御について、自動車技術会学術講演会前刷集 924159 1992-10

■ 著 者 ■



稲垣 裕 巳



阿久澤 憲司



佐藤 真 実