

# ステアバイワイヤの操舵制御

高松孝修 中野史郎

## Steering Control for the Steering-by-Wire System

T. TAKAMATSU S. NAKANO

This paper describes the strategy as to reactive torque control on the steering wheel for the Steering-by-Wire System, which has no mechanical connection between the steering wheel and the steering gear. In the front tire angle control system which corresponds to steering maneuvering, the reactive torque helps to decrease the system response delay mainly caused by the steering actuator. Along with the direct yaw moment control system of steering wheel maneuvering, for the Steering-by-Wire System, we propose another control strategy on the steering wheel. We confirmed the effectiveness and importance of each control with computer simulation and actual vehicle test.

**Key Words:** steering, steering-by-wire system, torque control

### 1. はじめに

最近の自動車では制動力や駆動力を四輪独立制御し、車両のスピン等を防止させるDYC(Direct Yaw-moment Control)技術が実用化されている。しかし、操舵装置は油圧やモータトルクによる操舵力補助の域を脱していない。

車両の状態に応じて前輪を自動操舵し、車両を安定させる技術も研究されているが、運転者のステアリング操作と自動操舵の干渉を防止しなければ、運転者は違和感を覚える。つまり、ステアリングホイールとステアリングギヤの機構的結合がある限り実現は困難である。

ところが、飛行機やヘリコプタでは、操縦桿と各アクチュエータ間の機構的結合を廃止したフライバイワイヤ<sup>2)-3)</sup>が実用化されており、操縦桿は目標運動の入力装置<sup>4)</sup>として機能する。機体への外乱補償や振動抑制などの制御は、操縦桿に影響を及ぼさない。フライバイワイヤは信頼性、ヒューマンインタフェース、コストといった課題を克服し、広く実用化されている。

そこで、操舵系から機構的結合による制約を除き、前輪自動操舵による車両安定化を実用化するため、ステアバイワイヤ技術の開発を行った。

### 2. システムの概要

図1にシステムの概略を示す。

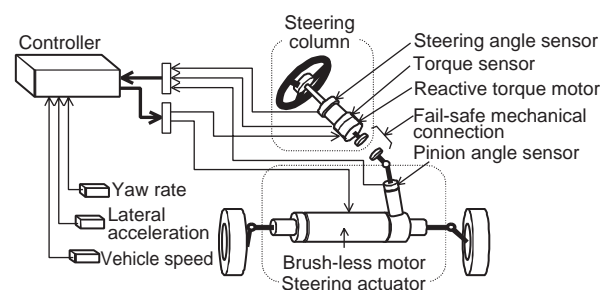


図1 システム構成<sup>5)</sup>  
System construction

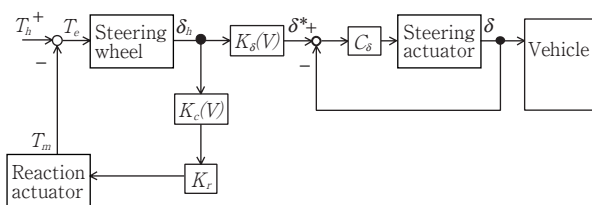
運転者のステアリング操作は操舵角センサおよびトルクセンサで測定される。コントローラは各種センサ情報から操舵アクチュエータを介して前輪舵角を制御する。操舵アクチュエータにはブラシレスモータを用いたラック同軸タイプの電動パワーステアリングを採用する。機構的結合がないため、運転者に対して操舵反力を与える必要があり、減速機を介して反力トルクモータによって発生させる。

システムに故障が発生した場合、ステアリングホイールとステアリングギヤを機械的に結合し、従来の装置に復帰するフェールセーフ構造を採用した。

### 3. 前輪舵角直接制御

#### 3.1 制御則

図2に制御ブロック図を示す。



- $T_h$  : ドライバ入力トルク
- $T_m$  : 反力モータトルク
- $T_e$  : ステアリングホイール回転トルク
- $\delta_h$  : ステアリングホイール角
- $K_s(V)$ : 目標前輪舵角ゲイン
- $\delta^*$  : 目標前輪舵角
- $\delta$  : 実前輪舵角
- $C_s$  : 前輪舵角制御器
- $K_c(V)$ : コーナリングフォース係数
- $K_r$  : 反力トルク比例ゲイン

図2 前輪舵角直接制御のブロック図<sup>5)</sup>  
Block diagram of front tire angle control

前輪舵角直接制御とは、前輪舵角 $\delta$ をステアリングホイール角 $\delta_h$ に比例した値 $\delta = K_s(V)\delta_h$ に追従させる最も基本的な制御である。ただし、仮想的なギヤ比 $K_s(V)$ は車速 $V$ の関数として自由に設定でき、従来の機構的制約から完全に解放される。反力トルクモータによる操舵反力 $T_m$ のもとで運転者がステアリングホイールに操舵トルク $T_h$ を作用させると、ステアリングホイール角 $\delta_h$ と車速 $V$ により目標前輪舵角 $\delta^*$ が決定し、操舵アクチュエータのフィードバック制御で実舵角 $\delta$ が発生する。

#### 3.2 操舵反力制御

従来の車両では、ステアリングホイールに伝わる反力はコーナリングフォースに比例しており、これは前輪舵角と車速に応じて大きくなり、あるスリップ角以上で飽和する。ステアバイワイヤでは、原理的にこのような反力は伝達されていない。そこで、反力トルクモータにより操舵反力を制御することになる<sup>6)・7)</sup>。操舵アクチュエータの応答性には限界があるため、操舵反力を作用させ、ステアリングホイール角の変化をアクチュエータの応答性の範囲内に収めることで、車両挙動の遅れは運転者から感知されなくなる。

ここでは、操舵反力 $T_m$ として、コーナリングフォースに相当する力を与えることとし、ステ

アリングホイール角 $\delta_h$ にコーナリングフォース係数 $K_c(V)$ 、および操舵反力比例ゲイン $K_r$ を乗じた式(1)にて算出する。この比例ゲイン $K_r$ により操舵感覚を調整する。ステアリングホイールはロックツーロックを1から2回転程度に設定しており、動作域においては常に、上記の比例関係が維持される。

$$T_m = K_r K_c(V) \delta_h \tag{1}$$

#### 3.3 操舵応答シミュレーション

##### 3.3.1 ドライビングシミュレータ

運転者が実際に感じる旋回感は横加速度とヨーレートの代数和として定義される、次の $D^*$ に相当すると考えられる<sup>8)</sup>。

$$D^* = K_1 G_y + K_2 \gamma \tag{2}$$

$K_1$ 、 $K_2$ は横加速度とヨーレートの重みを決定する定数である。 $K_1$ が大きいと横加速度制御の性格が強くなり、 $K_2$ が大きいとヨーレート制御に近付き、車速に応じて変化する。

使用したシミュレータを図3に示す。



図3 ドライビングシミュレータ<sup>5)</sup>  
Driving simulator

3面のCRTに画像を表示し、6軸の電動モーション台で車両挙動を再現する。概略性能を表1に示す。

車両運動モデルには四輪モデルを採用した。タイヤ特性はマジックフォーミュラ<sup>9)</sup>により設定し、車両諸元、特性は実験車両の値を用いた。

表1 概略性能<sup>5)</sup>  
Driving simulator specification

Basic performance			
Motion	Movement	Max. speed	Max. acceleration
X-axis	+ 170mm - 200mm	300mm/s	0.5G
Y-axis	± 180mm		
Z-axis	+ 230mm - 190mm		
Roll	± 0.3rad	0.44rad/s	-
Pitch			
Yaw			
Modification parameter			
Road friction( $\mu$ )		0.1 ~ 1.0	
Vehicle speed		0 ~ 50	
Drive system		FF, FR, 4WD	
Courses		Highway, Test course	
Vehicle specification		38 parameters	

### 3.3.2 シミュレーション結果

路面抵抗  $\mu=1.0$  のアスファルト路を車速  $16.7\text{m/s}$  , ステアリングホイール角の片振幅  $1.57\text{rad}$  , 操舵周期  $T=3$  秒で正弦波操舵スラロームを行った。操舵反力のない  $K_r=0$  の場合と、ステアリングホイール角  $1.57\text{rad}$  で操舵反力が約  $5\text{N}\cdot\text{m}$  となる  $K_r=8$  とした。

図4に示すように、 $K_r=0$  の場合、A部での入力トルクの極大に対して、応答遅れ時間  $t_1$  秒後のB部でステアリングホイールの回転方向が反転し、 $D^*$  の極大は  $t_2$  秒後のC部で現れた。この際、 $t_2$  が大きいほど運転者は応答遅れを強く感じた。一方、 $K_r=8$  の場合、 $t_1, t_2$  とともに減少し、運転者の応答遅れ感も減少した。

### 3.4 実車検証

前節のシミュレーションの効果を実車試験にて確認した。実験条件はドライビングシミュレータの場合と同一である。結果を図5に示す。

操舵反力の付加により入力トルクに対するステアリングホイール角、および  $D^*$  の応答遅れが改善され、運転者の応答遅れ感もシミュレーション実験と同様に改善された。

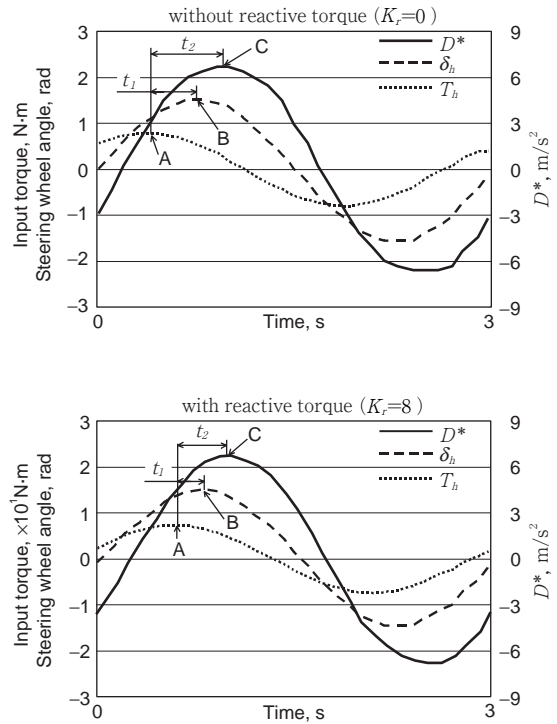


図4 シミュレータによる応答遅れ<sup>5)</sup>  
Response delay on driving simulator

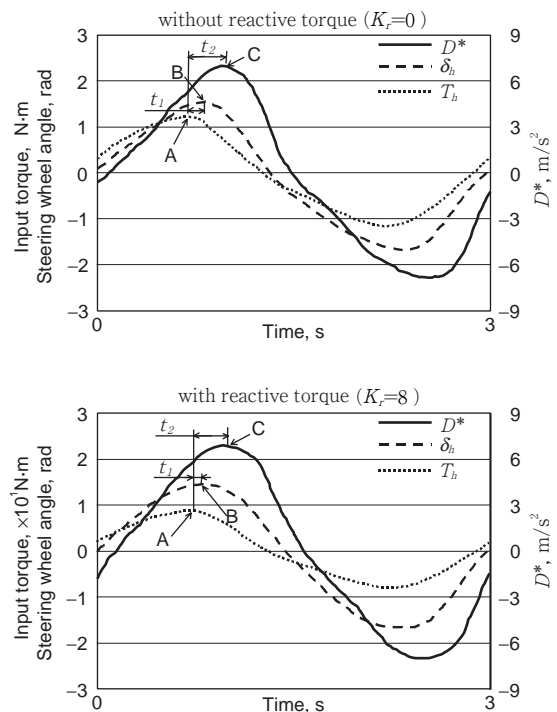


図5 実車試験による応答遅れ<sup>5)</sup>  
Response delay on actual test vehicle

図6に $K_r$ を0から12まで変化させた場合の、ステアリングホイール角と $D^*$ の位相遅れ $2\pi t_1/T$ ,  $2\pi t_2/T$ を示す。シミュレーション結果と実測値は良く一致している。 $K_r=8$ より $K_r=12$ の方が位相遅れは小さい。ただし、反力が強すぎるとステアリングホイール角が小さく、かえって応答遅れ感が増加した。

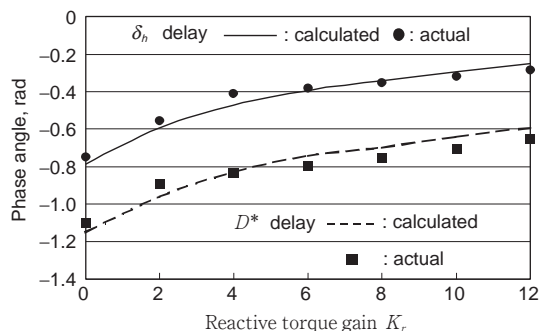


図6 位相遅れ<sup>5)</sup>  
Phase angle delay

この時の $K_r=0, 8, 12$ におけるステアリングホイール角速度の波形を図7に示す。

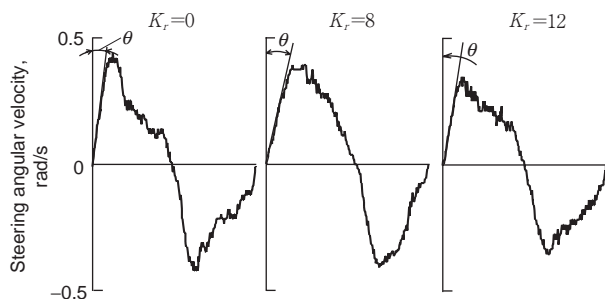


図7 ステアリングホイール角速度の比較<sup>5)</sup>  
Comparison of steering angular velocity

$K_r=8$ のとき、波形は最も正弦波に近く、切り込み初期のステアリングホイール角加速度も低かった。図中の  $\theta$  が大きいほど初期のステアリングホイール角加速度は低い。一方、 $K_r=12$ の場合は $K_r=0$ と同様に波形が乱れ、ステアリングホイール角加速度が高くなった。操舵反力が強すぎると、切り返した際などに、そのばね性によりステアリングホイールが押し戻され、かえって角加速度が増加する。このように、実装の際は人間特性を味して $K_r$ を決定・調整する必要がある。

#### 4. $D^*$ 制御

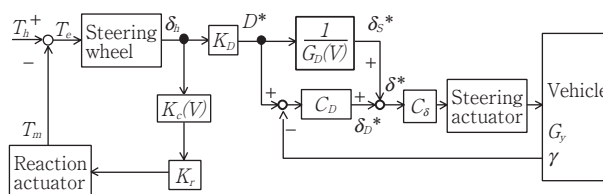
ステアバイワイヤ車両では操舵アクチュエータとステアリングホイールが機械的に繋がっていないため、運転者の操舵と関係なく、操舵アクチュ

エータ側で自由に前輪舵角を制御できる。

4WS車両では後輪舵角制御によるヨーレート安定化<sup>10)</sup>が実用化されているが、2WS車両における前輪舵角への車両状態フィードバックにはステアバイワイヤ技術が不可欠である。本章での $D^*$ 制御では、ステアリングホイールからの入力により横加速度とヨーレートの一次結合値を設定し、操舵アクチュエータによる前輪操舵で目標指標へ追従させる。

#### 4.1 制御則

従来の車両は一定ギヤ比であるから、ステアリングホイール角に対するヨーレートの定常ゲインは車速とともに増大する。ギヤ比を可変にすると、ステアリングホイール操作による車両挙動がほぼ一定に保たれて、操縦性が向上することが指摘されている<sup>11)~12)</sup>。そこで、制御量として3.3項、式(2)に示した $D^*$ を採用し、ステアリングホイール角に対する定常ゲインが一定となるようにフィードフォワード・フィードバック(以下FF・FBと称す)統合制御を行う。なお、低速時は、ヨーレート、横加速度は低く、むしろ、前輪舵角直接制御が妥当であるが、制御切換による衝撃も避けなければならない。そこで、 $D^*$ 指標に舵角を重畳し、低速時に対応する。中高速域では、舵角の寄与は小さいため、以下では舵角を重畳した場合を含めて $D^*$ とよぶ。全系のブロック線図を図8に示す。



- $K_D$  : 目標 $D^*$  比例ゲイン
- $G_D(V)$ : FFゲイン
- $\delta_s^*$  : FF制御部目標前輪舵角
- $\delta_D^*$  : FB制御部目標前輪舵角
- $C_D$  : フィードバック制御器

図8  $D^*$ 制御のブロック図<sup>5)</sup>  
Block diagram of  $D^*$  control

ステアリングホイール角 $\delta_s$ にゲイン $K_D$ を乗じて目標 $D^*$ とする。すなわち、 $D^*$ は車速に関わらずステアリングホイール角に比例する。フィードフォワード成分とヨーレート、横加速度からのフィードバックにより前輪舵角を制御する。



4.2 シミュレーション結果

ドライビングシミュレータを使用し、 $D^*$ 制御による効果を、横風入力に対する車両の安定性によって評価した。車速16.7m/sでアスファルト路を直進中に、12m/sの横風が進行方向に対して右側より、車両重心に4.5秒間作用する。運転者は常にレーンに追従して直進状態を維持しようとする。図9にその結果を示す。なお、図中のステアリングホイール角 $\delta_h$ 、および前輪舵角 $\delta$ は左操舵を正方向とした。

破線で示す前輪舵角直接制御では、横風によって車両の進行方向が左になり、運転者がこれを認知して、約0.6秒後にステアリングホイールを右方向に修正操舵を入力し始めた。前輪舵角はさらに約0.2秒後に応答して、これに伴って $D^*$ 値がようやく減少した。

一方、 $D^*$ 制御の場合、運転者はステアリングホイール角を中立位置に保舵するだけで、横風的作用後約0.2秒で運転者の応答より早く操舵装置側で自動的に制御が行われ、 $D^*$ 値の変化は効果的に抑え込まれた。横風停止後の挙動乱れも短時間で収束し、ステアバイワイヤによる $D^*$ 制御の有効性が確認された。

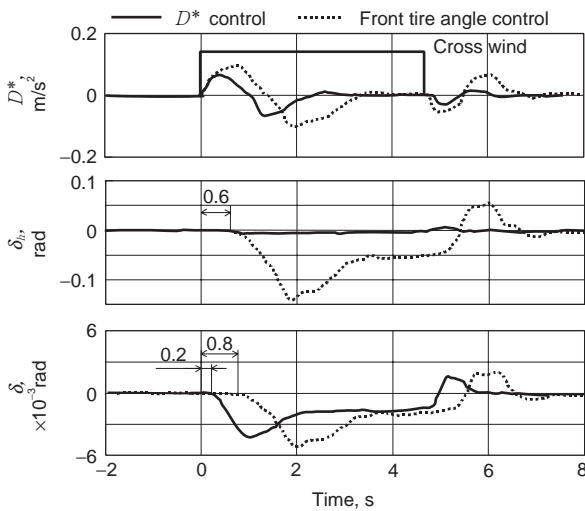


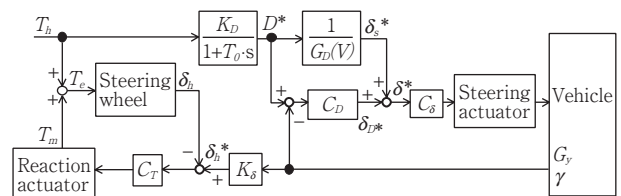
図9 横風が作用したときの車両挙動<sup>5)</sup>  
Vehicle behavior against cross wind

5. 操舵トルク検出型 $D^*$ 制御

前章までの車両制御は、いずれもステアリングホイール角の関数として前輪舵角、あるいは $D^*$ 値の目標値を決定している。そこでは、ステアリングホイールは単なる入力装置に過ぎないので、反力トルクを与えて操舵アクチュエータの応答性を越えた回転を防止しなければ、実際の操舵がステアリングホイール角に追従しなくなる。本章で

はこれに代えて、操舵トルクの検出により目標値を設定し、ステアリングホイールに車両挙動の表示装置としての機能を追加する方法について考察してみる。図10に制御ブロック図を示す。

基本的な制御は $D^*$ 制御であり、目標値を操舵トルクにより決定するから、操舵トルク検出型 $D^*$ 制御とよぶことにする。運転者の操舵トルク $T_h$ はトルクセンサにより検出され、一次遅れ要素により目標 $D^*$ へ変換される。車両制御器はフィードフォワード・フィードバック併用制御によりこの $D^*$ を実現する。もはや、ステアリングホイール角 $\delta_h$ と操舵入力には直接の依存関係はないため、ここでは反力トルクモータの出力 $T_m$ により、 $\delta_h$ が車両の $D^*$ を正確に反映した値 $\delta_h^*$ へ追従するように回転を制御する。しかし、反力トルクの呈示が目的ではなく、制御量はあくまでステアリングホイール角である。運転者は $\delta_h$ を通じて車両の $D^*$ を常時、正確に把握でき、ステアリングホイールと車両挙動の間でくいちは生じない。



- $T_0$  : 時定数
- $s$  : ラプラス演算子
- $\delta_h^*$  : 目標ステアリングホイール角
- $C_T$  : ステアリングホイール制御器
- $K_s$  : 目標ステアリングホイール角比例ゲイン

図10 操舵トルク検出型 $D^*$ 制御のブロック図<sup>5)</sup>  
Block diagram of steering torque detection type  $D^*$  control

ステアリングホイール角を検出する前出の方式では、緊急回避動作などで必要となる急操舵において、反力トルクモータ系の出力や等価慣性モーメントが障害となり、目標値とすべきステアリングホイール角が変化し難くなる。これでは、車両挙動の遅れが避けられない。一方、本章のトルク検出方式では、運転者の操舵トルクが直ちに車両制御に反映される点が長所となる。このような関係をドライビングシミュレータにより確認した結果を図11に示す。

実験では、車速16.7m/sの直進状態において、急操舵による横移動量4.0mのレーンチェンジを行った。ステアリングホイール角を検出する方式

と比べると、トルク検出型  $D^*$  制御では、運転者の操舵トルク入力に対する車両の応答遅れが、約 0.4 秒から約 0.2 秒へかなり短縮された。

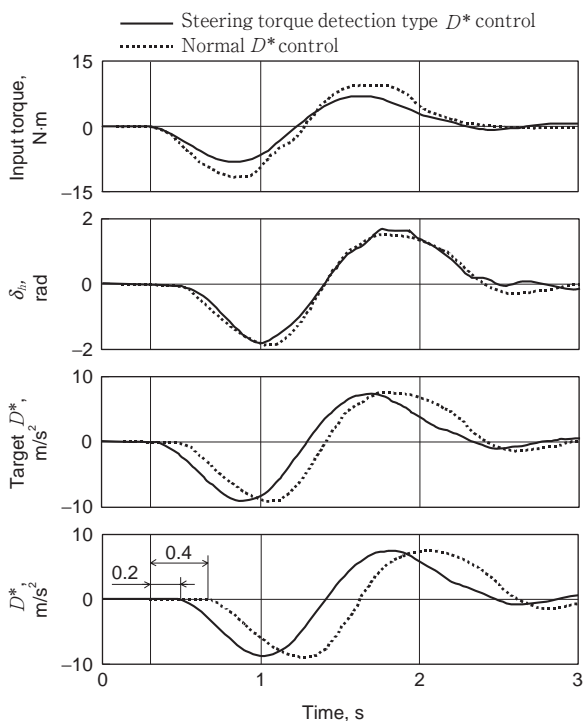


図11 レーンチェンジ時の車両挙動<sup>5)</sup>  
Vehicle behavior on lane change

## 6. おわりに

自動車用ステアバイワイヤによる前輪舵角直接制御、 $D^*$  制御におけるステアリングホイール反力制御、ならびに、操舵トルク検出型  $D^*$  制御について、特長と効果をドライビングシミュレータ実験と実車試験に基づいて紹介した。

ステアリングホイール反力制御は車両の応答遅れ感を抑制する効果がある。 $D^*$  制御は前輪操舵により外乱補償を実現させる。操舵トルク検出型  $D^*$  制御は、入力トルクに対する車両挙動の応答性を向上させる効果が認められた。今後は、人間特性の定量化により、これらの制御方法の特性を評価し、実装においては、適応制御の採用を検討していく。

## 参考文献

- 1) 杉山瑞穂, 井上秀雄, 内田清之, 門崎司朗, 稲垣匠二, 城戸滋之: トヨタテクニカルレビュー, vol. 46, no. 2 (1996) 60.
- 2) 富尾 武: 自動車技術会学術講演会前刷集 983 (1998) 51.
- 3) 大林秀彦, 富尾 武: 防衛技術ジャーナル,

- 14-5 (1994) 25.
- 4) 遠藤 浩: ハイテク機はなぜ落ちるか, 講談社 (1998) 74.
- 5) 中野史郎, 高松孝修, 西原 修, 熊本博光: 自動車技術会論文集, vol. 31, no. 2 (2000) 53.
- 6) 山崎一平, 鎌田 実: 自動車技術会論文集, vol. 29, no. 3 (1998) 117.
- 7) 鎌田 実, 山崎一平: 自動車技術会学術講演会前刷集981 (1998) 165.
- 8) 金井喜美雄, 越智徳昌, 藤代武史, 伊藤健, 川辺武俊: 計測自動制御学会論文集, (1988) 104.
- 9) E. Bakker, H. B. Pacejka, L. Lidner: SAE paper 890087 (1989).
- 10) 中島 孝, 安達和孝, 大池 充, 神田勝幸: 自動車技術会学術講演会前刷集No. 44-99 (1999) 1.
- 11) 天野也寸志, 土井俊一, 川口 裕: 自動車技術会学術講演会前刷集983 (1998) 265.
- 12) 清水康夫, 河合俊岳, 杠 順司, 滝本繁規: 自動車技術会学術講演会前刷集No. 21-99 (1999) 9.

## 筆者



高松孝修\*

T. TAKAMATSU



中野史郎\*\*

S. NAKANO

\* 総合技術研究所 電子システム研究所  
電子システム技術開発部

\*\* 総合技術研究所 電子システム研究所  
電子システム技術開発部 工学博士