

# ステアバイワイヤのフェールセーフ機構における 反カトルクに関する研究

## A Study of Reactive Torque Control for Steer by Wire with Mechanical Fail-safe Device

瀬川雅也 M. SEGAWA 葉山良平 R. HAYAMA 中野史郎 S. NAKANO

*The advantages of vehicle stability control are confirmed with the Steer by Wire system (SBW), which has no mechanical linkage between a steering wheel and the steering gear. SBW without mechanical linkage, however, has to be redundant to avoid a loss of steering if a failure occurs. We simulated the reactive torque generated by SBW with mechanical fail-safe device, which improves the reliability of SBW, and investigated the influence on the driver using driving simulator when the active front-wheel steering control is operated. Also we performed preliminarily analysis to control the reactive torque considering the number of components to be minimum. We found the effect to reduce the reactive torque by changing the dynamics of the system.*

**Key Words:** steer by wire, fail-safe, reactive torque, active front-wheel steering control

### 1. はじめに

制動・駆動力のアクティブ制御システムが量産車両に採用され、車両挙動の安定化において、その有効性が認められているが、このアクティブ制御を通常のステアリングシステムに適用すると、たちまち運転者との干渉が生じてしまう<sup>1)</sup>。したがってアクティブ操舵制御システムでは、運転者とステアリング制御が干渉しないことが必要である。

このため、当社ではステアリングホイールとステアリングギヤが機械的に結合していないステアバイワイヤシステムの開発を行い、このシステムがアクティブ操舵制御に適していること、さらには制動力制御によるダイレクトヨーモーメント制御システム<sup>2)</sup>(DYC)では大きな制御効果が期待できないμスプリット路急制動試験などにおいて、前輪舵角自動制御による車両姿勢安定化効果を実車試験により確認した<sup>3)4)</sup>。

前輪舵角自動制御はその効果から運転者の操舵支援に大きく貢献すると考えられるが、ステアバイワイヤをすぐに量産車に適用するには法規制・信頼性・生産コストなどの面における課題が多い。このため、当社ではステアバイワイヤの信頼性向上の一手段として、機械的フェールセーフ機構の導入が有効であると考えている。しかしながら、従来機能を持たせたステアバイワイヤに機械的結合を付加した場合、運転者との操舵干渉、特に前輪舵角自動制御を行った際の干渉が懸念される。

本報では機械的フェールセーフ機構を有するステアバイワイヤにおける運転者との操舵干渉、ならびに干渉低減に寄与するダイナミクスパラメータについての基礎検討を行った。

### 2. ステアバイワイヤのフェールセーフ

ステアバイワイヤはその機構上、ステアリングコラムとステアリングギヤの間に機械的な結合を持たないため、実用化へはフェールセーフ技術の確立が重要となる。ステアバイワイヤのフェールセーフ技術の中で最も重要と考えられるのが操舵不能を防止するという点であり、通常のステアリングとは全く異なる点でもある。ステアバイワイヤでは前輪舵角制御系を航空機に見られるような多重系とするフェールセーフが基本となっている。多重系にする部分は様々であり、他社ではフェール時に入力軸の回転をクラッチ<sup>5)</sup>や油圧システムを用いて伝達する機械的なフェールセーフについての研究が行われている。当社においてはフェールセーフ用前輪舵角制御モータの付加をはじめとする電気的フェールセーフについての研究を行ったが、機械的なフェールセーフに関する研究が遅れていた。この原因として、機械的結合時におけるステアリングホイール角と前輪舵角の角度差が挙げられる。ステアバイワイヤではハンドルホイール角に対する前輪舵角の比が通常ステアリングのように一定ではなく、しかも姿勢安定化制御時にはハンドルホイール角と前輪舵角が逆位相となる場合もある。逆位相となった場合にクラッ

チのような結合 / 切り離しによるフェールセーフ機構によりステアリングコラムとステアリングギヤを結合させると運転者の意図する操舵方向と前輪舵角の転舵方向が逆方向となり運転者に違和感を与えることが予想されたためである。

しかしながら、ステアバイワイヤの普及を考慮した場合、信頼性の観点から電氣的フェールセーフのみよりも機械的フェールセーフを備えた方が受け入れられやすいと思われる。当社ではステアバイワイヤの機械的フェールセーフは前述のようなフェール時のみの結合ではなく、常時結合が必要であると考えている。このためフェールセーフ機構はハンドルホイール角(入力角)とピニオン回転角(出力角)の角度差を許容できるものでなければならぬ。

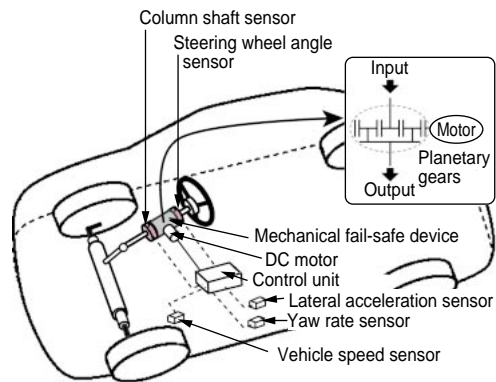


図1 システム構成  
System construction

### 3. 検証システム概要

入出力角の角度差を許容させるために種々の差動機構の中からサイズ、コスト、許容伝達トルクなどの条件を鑑みて遊星ギヤを組込んだフェールセーフ機構を用いて検討を行った。図1にフェールセーフ機構の配置ならびにその構造を示す。フェールセーフ機構はステアリングコラム部とステアリングギヤの間に配置され、入出力軸の角度差をモータにより制御する簡便なものとした。これにより、アクティブ操舵制御により発生する入出力角度差がフェールセーフ機構を通じ運転者に与える影響について調査を行った。

図2に本報で用いた制御ブロック図を示す。

ギヤ比可変制御ではステアリングホイール角に対するヨーレートゲインが一定となるようステアリングホイール角  $\delta_h$  と車速  $V$  によりギヤ比係数  $K(V)$  を設定し、フィードフォワード目標舵角  $\delta_{FF}^*$  を決定する。本システムでは前輪舵角自動制御による車両姿勢安定化制御を行うため、ギヤ比可変制御にヨーレートフィードバック制御を重畳している。ギヤ比可変制御部とヨーレートフィードバック制御部から決定される目標前輪舵角  $\delta^*$  に、実前輪舵角  $\delta$  を追従させるようにフェールセーフ機構部のモータを駆動する。ステアリングホイールへ伝達されるトルク(以下反力トルクと称す)、すなわち運転者の操舵トルクはフェールセーフ機構の出力軸、すなわちピニオン軸周りに発生するトルク  $T_{pi}$  に比例定数  $K_T$  を乗じたトルク  $T_r$  で表される。

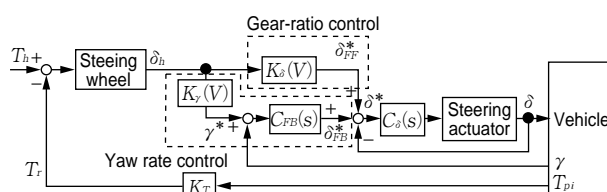


図2 制御ブロック  
Control block diagram

- $T_h$  : Driver's input torque
- $T_r$  : Reactive torque for driver
- $T_{pi}$  : Reactive torque for pinion shaft
- $\delta_h$  : Steering wheel angle
- $\delta^*$  : Target front wheel angle
- $\delta$  : Front wheel angle
- $\delta_{FF}^*$  : Feed forward target front wheel angle
- $\delta_{FB}^*$  : Feedback target front wheel angle
- $K_T$  : Reactive torque gain
- $K_g(V)$  : Target front wheel angle gain
- $K_y(V)$  : Target yaw rate proportional gain
- $C_{FB}(s)$  : Yaw rate feedback controller
- $C_\delta(s)$  : Front wheel angle controller
- $\gamma$  : Yaw rate
- $\gamma^*$  : Target yaw rate

### 4. 機能検証

#### 4.1 車両姿勢安定化制御検証

フェールセーフ機構が運転者に与える影響を調査するため、試験条件の統一などの理由から図3に示すモーション台を装備したドライビングシミュレータにフェールセーフ機構モデルを実装し試験を行った。表1にはドライビングシミュレータに搭載した車両モデルのパラメータを示す。



図3 ドライビングシミュレータ  
Driving simulator

表1 車両モデル諸元  
Vehicle model specifications

項目	諸元	項目	諸元
車両モデル	4輪モデル	トレッド	1.515m
駆動方式	FF	車両重量	1500kg
ホイールベース	2.515m	タイヤモデル	非線形モデル

試験は図4に示すように、乾燥アスファルト路上を27.8m/sで走行している車両に進行方向右側より18m/sの横風を作用させた。運転者は通常走行時にはステアリングホイールに手を添える程度で直進状態を保ち、横風時にはできるだけ車両の挙動変化を抑えるように操舵を行うものとした。横風は運転者への警告等なしに発生させた。この試験では、横風発生時にヨーレートフィードバック制御により前輪舵角のみが変化するため、ハンドルホイール角との間に角度差が発生する。また、本試験では姿勢制御時のみの影響を検証するため、ステアリングギヤ比は一定としている。

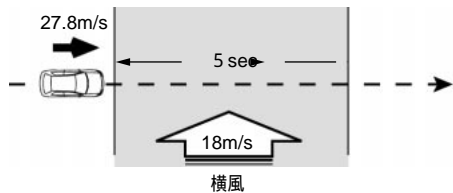


図4 試験条件  
Test conditions

このときのステアリングホイール角を図5(a)に、前輪舵角を図5(b)に、ヨーレートを図5(c)に、反力トルクを図5(d)に示す。各図における縦軸の正値は車両進行方向に対し左側を、各図中の灰色の領域は横風外乱が車両に作用している時間を示している。機械的フェールセーフを備えたステアバイワイヤにおけるヨーレートフィードバック制御の有り(図中：赤線)、無し(図中：青線)に加え、通常の電動パワーステアリングモデル(図中：緑線)

を搭載した場合についても試験を行った。

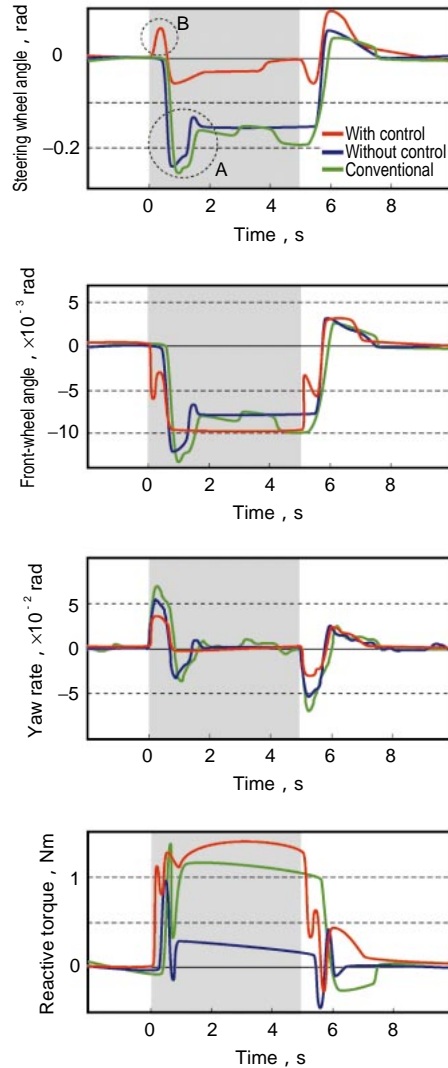


図5 横風外乱による挙動変化  
Vehicle behavior in crosswind

図5(a),(b)よりヨーレートフィードバック制御を行った場合はヨーレートを抑える方向に前輪舵角が自動的に制御され、ヨーレートフィードバック制御がない場合は運転者が前輪舵角を制御していることがわかる。また、そのタイミングは以前にステアバイワイヤにおいて検証した時と同じく、ヨーレートフィードバック制御ありの方が運転者の修正操舵よりも早く前輪舵角に変化が生じている。

図5(c)ではヨーレートフィードバック制御がない場合、運転者が車両挙動変化を感じた後に修正操舵を行っているため、ヨーレートが大きく変化している。ヨーレートフィードバック制御ありの場合は自動修正操舵によりヨーレートの初期変化が抑えられているおかげでヨーレートの変化ピーク値は小さい。



図5(d)において、ヨーレートフィードバック制御を行った場合、反力トルクは運転者の修正操舵方向に抵抗する向きに発生しており、横風終了時まで継続的に運転者に付与されていることがわかる。この反力トルクはヨーレートフィードバック制御による入出力角度差に応じて発生しており、ヨーレートフィードバック制御を行わない場合は入出力角差が発生せず、保舵時の反力トルクにその違いが見られる。

この自動修正操舵が運転者に与える影響を操舵情報から評価を行う。図5(a)でヨーレートフィードバック制御を行った場合、修正操舵初期時においてA部に見られるような車両を直進状態へ立て直すための操舵が他の場合と比べ不要となっていること、ステアリングホイールがほぼ中立付近にあり、修正操舵初期段階でのステアリングホイール角変化速度も他の場合に比べて小さいことから、運転者のハンドル操作量は軽減されている。また、運転者による修正操舵は外乱により発生するヨーレートがピークに達したのち行われており、ヨーレートフィードバック制御がある場合でもその傾向はほとんど変わらず、操舵方向も適切であることから、フェールセーフ機構がステアバイワイヤの機能を損なわず、かつ運転者に不適切な操舵を促していないことが分る。

しかし、反力トルクはヨーレートフィードバック制御がある場合、外乱作用直後に発生しているのに対し、ヨーレートフィードバック制御なし、通常ステアリングとともに運転者の操舵に応じて発生していることから、自動修正操舵により運転者の意図しないトルクが加わっているとみなすことができる。くわえて、B部に示すような反力トルク変動による運転者の意図しないステアリングホイール角の変化は全ての運転者には受容れられるものではない。

#### 4.2 操舵干渉の軽減

ヨーレートフィードバック制御時に発生する反力トルクは運転者の操舵に干渉する方向に発生するものの、ドライビングシミュレータ試験では運転者にとって不適切な操舵を促すような結果は得られなかった。しかしながら、ヨーレートフィードバック制御直後の反力トルク変動が問題点として挙げられる。

機械的フェールセーフを備えるステアバイワイヤを成立させるためには、この反力トルク変動を軽減、解消することが必要となる。

反力トルク変動の軽減、解消についてはさまざまな方法が考えられる。しかし、トルク変動補償用アクチュエータはステアバイワイヤという通常のスティングよりも複雑なシステムに付加するため、できるだけ単純な構成が望ましい。その第一段階として運転者へのトルク伝達経路におけるダイナミクスパラメータを変化させ、反力トルク変動へ与える影響を調査した。

試験は4.1と同条件で実施し、ヨーレートフィードバック制御により発生する反力トルク変動を伝達経路上の摩擦または粘性変更させることで軽減を試みた。横風外乱発生直後の反力トルク、スティングホイール角、前輪舵角、ヨーレートを図6に示す。図中赤線はシステムへの粘性導入時の変化を、青線は摩擦導入時、緑線はパラメータ変更なしの場合の変化を示している。

ダイナミクス変更の効果は図6の反力トルクの領域AからCの立ち上がり部分に現れており、パラメータ変更なしの場合と比較し摩擦を導入した場合はトルクの立ち上がりが遅れ、粘性を導入した場合は変化速度が抑えられているおかげで、ピーク値も小さい。スティングの動きに加え運転者の操舵感覚に影響する車両挙動とを併せて見ると、前輪舵角の領域Aでは横風外乱によるヨーレートの変化を抑えるように前輪舵角が変化している。Bの領域では反力トルク変動量の差がスティングホイール角変化の差となって現れており、それが前輪舵角変化に影響している。この領域では摩擦による抑制を行った方が外乱に対する修正操舵方向への変化量が大きいためヨーレート変化がさらに小さくなっている。しかしながら、Cの領域においては粘性の導入に対し摩擦を導入した方がヨーレートの変化が大きく車両挙動の安定性が低下しており、外乱発生後からの車両挙動変化は粘性を導入した方が小さい。この結果より、ヨーレートフィードバック制御時にフェールセーフ機構から発生する反力トルク変動の軽減には、摩擦よりも粘性を導入した方がトルク変動をより軽減できるとともに、車両挙動変化幅を抑えられることが判った。しかしながら、摩擦、粘性の個々のパラメータ変化だけでは発生した反力トルクを軽減できるものの、完全な解消には至らなかった。この結果より、フェールセーフ機構に付加するトルク補償用アクチュエータの制御において粘性パラメータを支配的にした制御が効果的であることが分る。

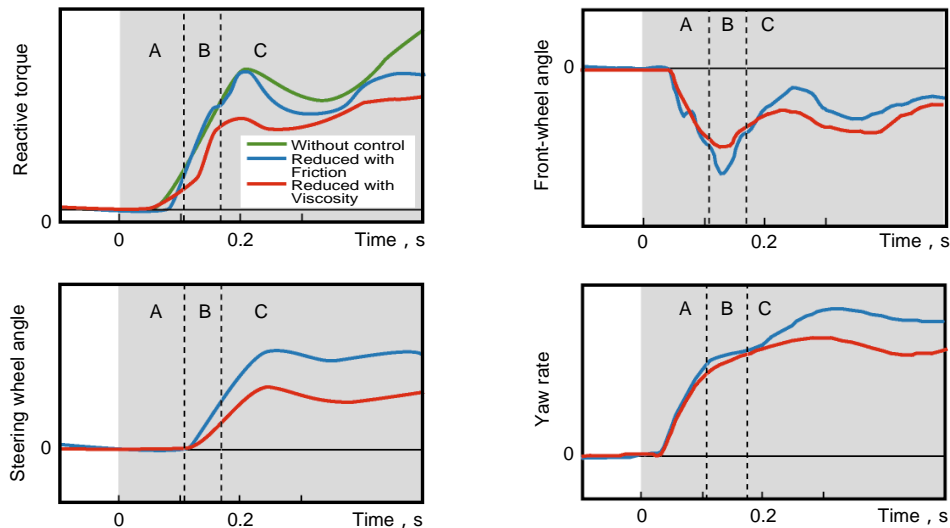


図6 反力トルク軽減効果  
Result of reactive torque control

## 5. おわりに

ステアバイワイヤシステムの信頼性を向上させるための機械的フェールセーフを備えたステアバイワイヤにおいて、システム成立への大きな障害となる前輪舵角自動制御時の運転者への操舵干渉についてドライビングシミュレータを用い検証した。この結果、前輪舵角自動制御時に発生する反力トルクは運転者に干渉する方向に発生し、かつ運転者の操舵意図とは無関係にステアリングホイール角を変化させるという結果が得られた。このため、前輪舵角自動制御時の反力トルクの軽減、解消を、システムを複雑にすることなく実現することを目的とし、第一段階として反力トルク伝達経路におけるダイナミクスを変化させたシミュレーションを行った。その結果、ダイナミクス変化による反力トルク軽減効果は認められたものの、解消するまでには至らなかった。

今後は実車による評価を含め、前輪舵角自動制御時を中心に、フェールセーフ機構を通じて運転者へ伝達される反力トルクの大きさ・変化率などの定量化を通じ、フェールセーフ機構の最適設計を行う。これに加え、最少のアクチュエータで反力トルク変動を解消するための検討も行い、これらを合わせて機械的結合を持たないステアバイワイヤと同等の操舵フィーリングをめざす。

## 参考文献

- 1) 重松 崇：A S Vのエレクトロニクス技術，自動車技術会シンポジウム，No. 9505，(1995) 1-6
- 2) 杉山瑞穂，井上秀雄，内田清之，門崎司朗，

稲垣匠二，城戸滋之：V S C ( Vehicle Stability Control ) システムの開発，トヨタテクニカルレビュー，Vol. 46，No. 2，(1996) 60-67

- 3) S. Nakano, T. Takamatsu : "Study of the Steer By Wire System" ; CD-ROM of the 6<sup>th</sup> congress on ITS, Canada (1999)
- 4) K. Nishizaki, R. Hayama, S. Nanano, K. Kato : "Active Stability Control Strategy for Steer By Wire System during Sudden Braking" ; CD-ROM of the 7<sup>th</sup> congress on ITS, Turin (2000)
- 5) Axel Pauly, Reidar Fleck, Goetz Baumgarten, Michael Eckrich, Philip Koehn ; "A Steer by Wire Concept for Passenger Cars designed for Function, Safety and Reliability" ; JSAE Spring Convention Proceedings, No. 60-01 (2001)

## 筆者



瀬川雅也\*  
M. SEGAWA



葉山良平\*  
R. HAYAMA



中野史郎\*\*  
S. NAKANO

\* 総合技術研究所 システム技術研究所  
電子システム研究部

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