

ハイブリッド車用油圧サーボブレーキシステムの開発

Development of Hydraulic Servo Brake System for Hybrid Vehicle

青木 康史*

Yasushi AOKI

中野 博 士*

Hiroshi NAKANO

鈴木 健 二*

Kenji SUZUKI

野尻 欣 主*

Yoshikazu NOJIRI

要 旨

ハイブリッド車の燃費向上のため、回生ブレーキを有効に活用しながら良好なブレーキフィーリングを実現するブレーキシステムを開発した。このシステムは、機械的な動作で主ブレーキを機能させる油圧サーボをベースにし、ソレノイドバルブ、油圧センサを組み合わせることで任意のブレーキ圧制御が可能となるものである。油圧サーボにストロークシミュレータを採用し、ブレーキ圧制御の影響を受けないブレーキフィーリングを得るとともに、回生ブレーキと協調した精度の高い圧力制御により安定したブレーキの効きを実現した。本システムを搭載したハイブリッド車において、従来システム比 46% の回生電力増加が確認できた。

ABSTRACT

A new brake system, able to make efficient use of regenerative brakes while maintaining excellent brake feel, has been developed to increase the fuel economy of hybrid vehicles. A hydraulic servo was used as a base to enable mechanical operation of the service brakes; solenoid valves and brake fluid pressure sensors were added to this base to make it possible to control brake line pressure as demanded. The use of a stroke simulator in the hydraulic servo prevents brake feel from being affected by the control of the brake pressure.

In addition, high-accuracy brake pressure control that functions cooperatively with the regenerative brakes is enabled-- resulting in stable braking effectiveness. Fitted in a hybrid vehicle, this system has been shown to regenerate 46% more energy than the previous system.

1. まえがき

地球環境保護の観点から、ハイブリッド車への注目が高まっている。ハイブリッド車は、減速時に車両の運動エネルギーを回生電力として回収し、回収した電力をモータの駆動に使うことでエンジン負荷を低減し、燃費を向上させる。従って、減速時に回生ブレーキを有効に活用して、回生電力量を増加させることが重要となる。しかし、単純に回生電力を増やすと回生ブレーキによりドライバの意図以上の制動力が発生してしまう。従来の一般的なブレーキシステムは、減速時のフィーリングを維持するために回生ブレーキを有効に使い切ることができなかった。回生ブレーキを有効に活用しながらドライバの意図する減速フィーリングを得るためには、回生ブレーキと油圧ブレーキを協調制御し、トータルの制動力をドライバが要求する値に合わせる必要がある^{(1), (2)}。

*四輪開発センター

回生と油圧ブレーキの協調制御を実現し、ハイブリッド車の燃費向上に寄与できるブレーキシステムを新たに開発した。このシステムは、主ブレーキを油圧サーボで機能させ、ブレーキ圧を任意に制御する機能を付加したものである。油圧サーボは主ブレーキ機能をつかさどる部品となるため、主ブレーキの性能および信頼性を高める設計も重要となる。

本稿では、開発したブレーキシステムの構成を紹介するとともに、主ブレーキの性能と信頼性向上、および回生と油圧ブレーキの協調制御を実現するために採用した技術要素について解説する。

2. 開発コンセプト

近年、各種ブレーキ制御機能を実現する目的で、ブレーキバイワイヤシステムが実用化されている^{(3), (4)}。このシス

テムはブレーキ圧を自由に制御でき、回生ブレーキとの協調制御も実現可能である。しかしながら、主ブレーキを電子制御に頼ることになるため、電気的な信頼性確保が重要になり解決すべき課題も多い^{(5)・(7)}。

本システムは、主ブレーキ機能を機械的に作動させることで信頼性を確保することを基本のコンセプトとした。主ブレーキ機能を機械的な油圧サーボで実現した上で、油圧サーボの出力をソレノイドバルブで電子制御し、各種制御機能を実現する構成とした。

3. 開発目標

本システムの主要機能は、主ブレーキ機能とブレーキ圧制御機能となる。各機能に対し、以下の項目を開発目標とした。

(1)主ブレーキ機能

良好なブレーキフィーリングの実現と高い信頼性を確保すること。

(2)ブレーキ圧制御機能

違和感のないブレーキフィーリングを維持しながら回生ブレーキを有効に活用できる回生と油圧ブレーキの協調制御を実現すること。

特に、回生と油圧ブレーキの協調制御については、以下の課題を解決する必要がある。

ハイブリッドモータで発生可能な回生トルクは、車速やバッテリーの充電状態等により変化する。ブレーキフィーリングを維持しつつ回生電力を取りきるためには、Fig. 1に示すように、刻々と変化する回生トルクに合わせて油圧ブレーキの制動力を精度よく制御する必要がある。

また一般的なブレーキシステムでは、ブレーキ圧とペダルストロークが一定の関係を持つため、ブレーキ圧を制御するとペダルストロークの変化が生じブレーキフィーリングが損なわれる。従って、ブレーキ圧が変化する協調制御中においてもペダル踏力とストロークの関係を一定に保つことも必要となる。

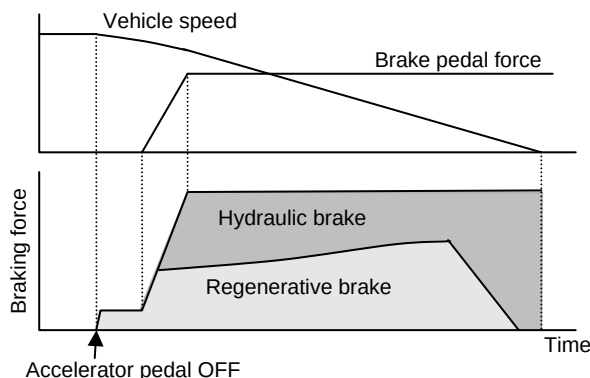


Fig. 1 Cooperative control of regenerative and hydraulic brakes

4. システム概要

システムは、Fig. 2 に示す3部品で構成される。

- (1)サーボユニット：ペダル操作量に応じたブレーキ圧を発生させるとともにブレーキ圧を任意に制御する。
- (2)パワーユニット：電動油圧ポンプにより高圧を作りアキュムレータに蓄圧し、サーボユニットのパワーソースとなる。
- (3)ペダルストロークセンサ：ペダル操作量を検出する。

4.1. サーボユニット

Fig. 3にサーボユニットの構造を示す。ストロークシミュレータとレギュレータバルブを直列に配置した油圧サーボ部にマスターシリンダを結合し、主ブレーキ機能の機械的な作動を実現する。また、油圧サーボ部にソレノイドバルブ4本と、油圧センサ3個を内蔵するとともに Electric Control Unit(ECU)を一体化し、ブレーキ圧を任意に制御できる構成とした。サーボユニットについては次章以後で詳述する。

4.2. パワーユニット

パワーユニットは Fig. 4 に示すように、3気筒のラジアルピストンタイプの油圧ポンプを電動モータで駆動する構

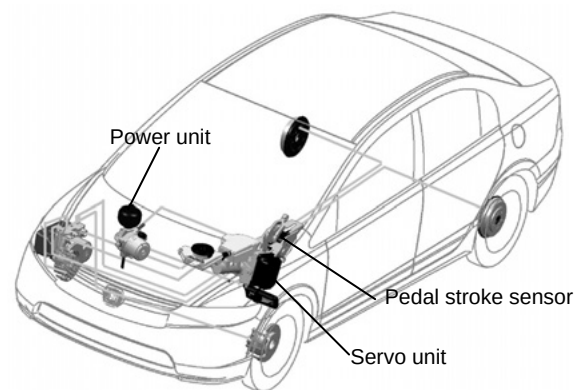


Fig. 2 System configuration

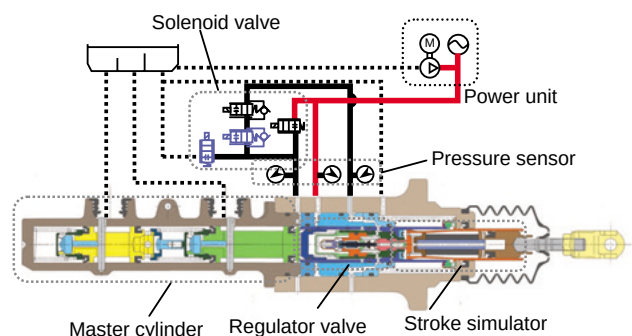


Fig. 3 Structure of servo unit

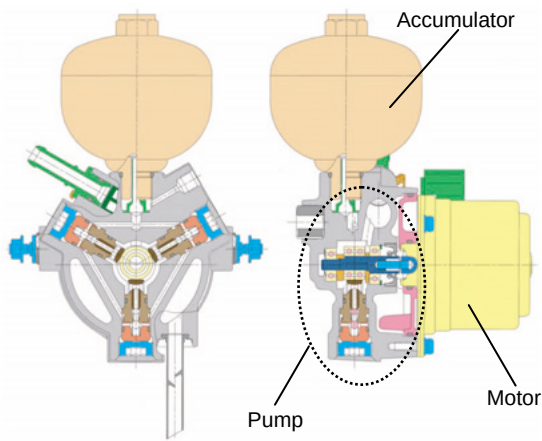


Fig. 4 Structure of power unit

造とした。油圧ポンプで発生した圧力は、アキュムレータに常時蓄圧される。

パワーユニットとサーボユニットは配管で接続される。アキュムレータ圧は常時サーボユニットに供給され、レギュレータバルブ部でシールされる。サーボユニット内のアキュムレータ圧導入油路に、油圧センサが配置され、このセンサ値に基づいてアキュムレータ圧を一定範囲に保つよう ECU がモータを駆動する。

4.3. ペダルストロークセンサ

サーボユニット内に機械的な故障が発生した場合、油圧センサだけでは確実な故障検出ができないため、ドライバのブレーキ操作量を検出する目的でペダルストロークセンサを採用した。

ペダルストロークセンサは、回転式の摺動抵抗タイプとした。ブレーキペダルブラケットに取り付け、リンクを介してペダルストロークを回転運動に変換している。

5. 主ブレーキ性能と信頼性

主ブレーキ機能の性能およびブレーキフィーリングは、油圧サーボ部の特性に依存する。また、高い信頼性を得るためには、システム故障時の性能に配慮した設計が必要となる。本章では、開発目標である主ブレーキ機能の性能と信頼性を、より高めるために採用した技術要素と得られた性能について解説する。

5.1. 油圧サーボ部の構成

油圧サーボ部は、ペダル入力に対するストロークを生成するとともに入力をレギュレータバルブに伝達するストロークシミュレータと、パワーユニットから供給される高圧をペダル入力に比例した圧力で調圧する機械的なサーボバルブであるレギュレータバルブで構成される。

レギュレータバルブで調圧された圧力(レギュレータ圧)

はマスターシリンダの背面(パワー室)にかかり、マスターシリンダのピストンが作動しブレーキ圧が発生する。

5.2. ストロークシミュレータ

ストロークシミュレータは Fig. 5 に示すように、内部に円筒状のゴム(Stroke damper)とスプリングが直列に配置される。ペダル入力によりこれらのバネ要素が順次たわみペダルがストロークする。ペダル踏力とストロークの関係は、これらバネ要素の特性のみで決定されることになり、ブレーキ圧の影響を受けない。従って、ブレーキ圧の制御状態によらずペダルフィーリングが一定に保たれることになる。

内部のスプリングは、入力初期の無効ストロークを作る目的で採用しており、ストローク量は小さい。ペダルストローク量はストロークダンパのたわみが支配的となり、ストロークダンパのゴム特性がブレーキフィーリングを決める重要な要素となる。

ゴムの基本特性を決める、ゴム硬度およびヒステリシスは良好なブレーキフィーリングが得られるようチューニングした。また、温度による硬度変化の少ないゴム材料を選定し、フィーリングの安定化を図った。

一般的なブレーキシステムのペダル踏力とストロークの関係は非線形で、踏力の増加に伴いストローク変化が小さくなる特性を持つ。これに対し、ゴムのバネ特性は基本的に線形となるため、ブレーキフィーリングとしては好ましくない。従って、ストロークダンパが挿入されるシリンダ

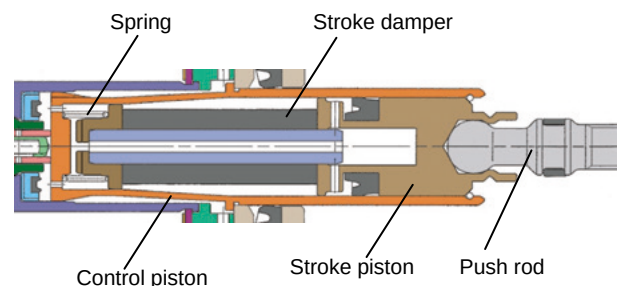


Fig. 5 Cross-section of stroke simulator

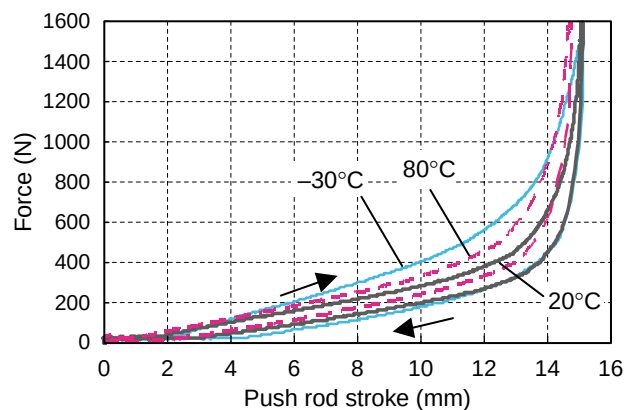


Fig. 6 Characteristic of stroke simulator

(Control piston)側をテーパ形状にし、ストロークシミュレータのバネ特性を非線形化した。ストロークの増加に伴い、ストロークダンパが先端側から順次シリンダに充填されていき、非線形なバネ特性が得られる。

Fig. 6にストロークシミュレータの温度毎の特性を示す。ストロークと入力との関係は温度依存性が少なく、またシリンダのテーパ化による非線形な特性が実現されていることがわかる。

5.3. レギュレータバルブ

Fig. 7 に示すレギュレータバルブは、ブレーキ踏み込み時に、アキュムレータに蓄圧された高圧をレギュレータ室に導入するインレットバルブと、ブレーキ解放時にレギュレータ室の圧力を解放するアウトレットバルブにより構成される。ブレーキ非操作時は、アキュムレータ圧がインレットバルブでシールされ、アウトレットバルブは解放状態となっている。ブレーキ操作時は、ペダル入力からストロークシミュレータを介してリアクションピストンに伝達され、リアクションピストンが前進しアウトレットバルブを閉弁、インレットバルブを開弁する。インレットバルブから導入された圧力によりリアクションピストンに後退方向の反力が発生するため、ペダル入力とリアクションピストンの反力が釣り合う位置でインレットバルブ、アウトレットバルブが閉弁し、レギュレータ圧が決まる。ブレーキ解放時は、アウトレットバルブが開弁するまでリアクションピストンが後退し、レギュレータ圧が減圧される。

インレットバルブを開弁する際、アキュムレータ圧に対抗する入力が必要となるため、インレットバルブのシール径が大きいとブレーキ圧が発生し始める起動荷重が大きくなり、踏み始めの空走感につながる。逆にインレットバルブのシール径を小さくすると、アキュムレータ圧の導入流路が絞られ急制動時の昇圧応答性が低下する。この相反する性能を満足させるため、インレットバルブを2段シール構造とした。入力初期は、小径のシール部が低い荷重で開弁するため起動荷重が軽減される。入力が早く、レギュレータ圧の応答が遅れる場合は、シャフトのストロークが増加し大径のシール部も開弁するため、高い昇圧応答が得られる。

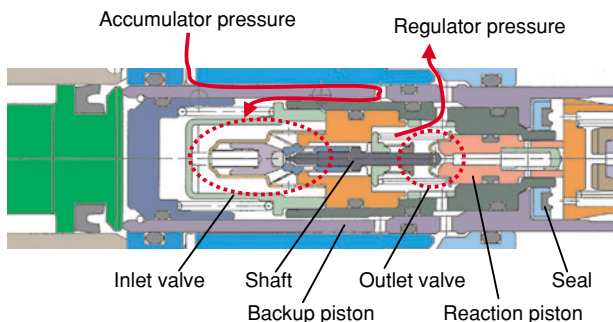


Fig. 7 Cross-section of regulator valve

Fig. 8 にペダル踏力と出力圧の関係、Fig. 9 に急入力時の昇圧応答の従来システムとの比較を示す。2段シール構造により、出力圧が発生し始める踏力は、従来の負圧サーボシステムと同等となった。また、従来システム以上の昇圧応答性も実現した。

5.4. パワーユニット故障時の性能

故障により、アキュムレータ圧が無くなった場合は、油圧サーボの機能が失われる。この故障状態では、ペダル入力からストロークシミュレータ、バックアップピストンを介して直接マスターシリンダに伝わる構造とした。倍力無しでマスターシリンダを作動させることになり、ブレーキの効きは従来の負圧サーボの故障と同等となる。

この際、ストロークシミュレータがストロークすると、従来システムに対しペダルストロークが増加してしまう。ストロークシミュレータのストロークを規制するために、ストロークシミュレータがバックアップピストンに当接する面にシール部材を配置した。このシール部材によりストロークシミュレータ内部のブレーキフルードを排出する油路が塞がれる。この結果、シミュレータが油密となり、シミュレータのストロークを抑えることができる。

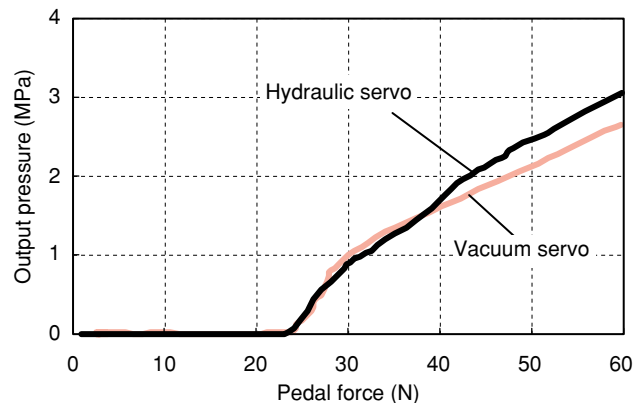


Fig. 8 Input and output characteristics

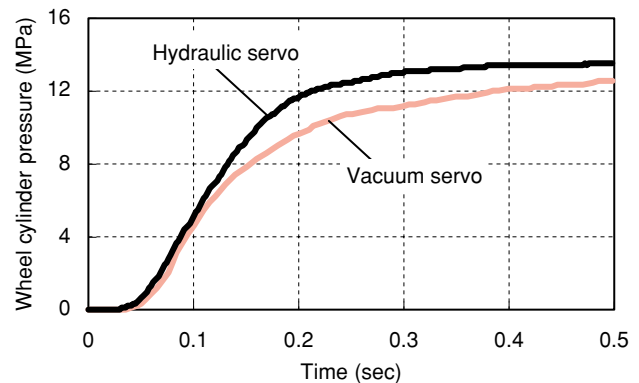


Fig. 9 Wheel cylinder pressure response at quick pedal input

Fig. 10に、パワーユニット故障時のストローク特性を示す。シミュレータのストロークが規制されることにより、従来システム同等のストロークとなった。

5.5. 電気系信頼性および ECU 構成

油圧サーボシステムでは、パワーユニットが機能停止すると制動性能の低下に繋がるため、ECUの設計にあたってはパワーユニットモータの駆動回路の信頼性確保が重要となる。本システムでは、モータ駆動回路の電源系、演算部、出力素子すべてを2系統化し、シングルフェイルでモータが停止しない構成を採り高い信頼性を確保した。

また、アキュムレータ圧を監視する油圧センサも2系統出力のタイプを採用し、センサの故障検出性を向上させている。

ソレノイドバルブの制御系に対しては、ソレノイドの電源供給ラインにフェイルセーフ用のFETを配置して、故障発生時にはソレノイドの電源を遮断できるようにした。主ブレーキは機械的に機能させられるため、ソレノイドバルブを停止させてもブレーキ性能に影響を与えない。Fig. 11 に ECU ハードウェアの構成を示す。

6. ブレーキ圧の制御

ブレーキ圧の制御は、各制御機能の要求に基づきパワー

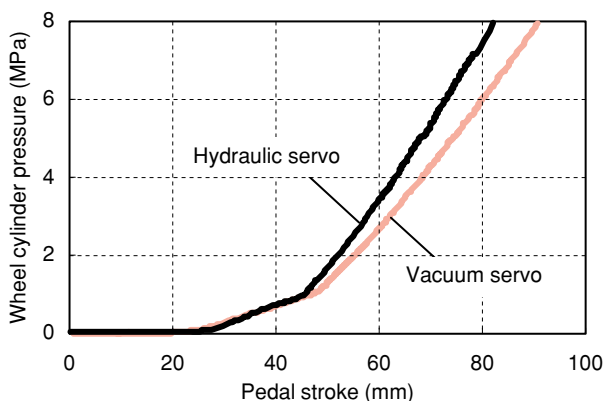


Fig. 10 Pedal stroke characteristics at power unit malfunction

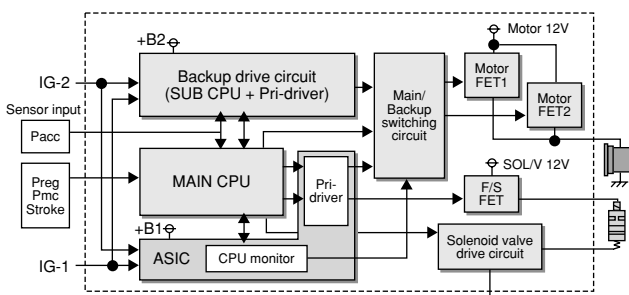


Fig. 11 ECU hardware block diagram

室の目標圧を決定し、パワー室に配置された油圧センサ値をフィードバックしながらソレノイドバルブを駆動して目標のブレーキ圧を発生させる。

前述した通り、ストロークシミュレータを採用したことにより、ペダル踏力とストロークの関係はブレーキ圧制御の影響を受けない。従って、目標圧に精度よく追従させる圧力制御を実現すれば、良好なブレーキフィーリングを達成できる。本システムでは、精度よい圧力制御を実現するために、高いロバスト性を持つことで知られる⁽⁸⁾スライディングモード制御を採用した。

6.1. ソレノイドバルブ

回生と油圧ブレーキの協調制御は、ドライバのブレーキ操作量となるレギュレータ圧に対し、パワー室の圧力を減圧方向に制御する必要がある。一方で、ドライバの操作とは無関係に、またはブレーキ操作量以上のブレーキ圧を発生させる加圧方向の制御ニーズもある。これら圧力状態の異なる制御を実現するため、サーボユニット内のレギュレータ室とパワー室間に、減圧用2本、加圧用2本のソレノイドバルブを配置した。加圧、減圧制御とも、レギュレータバルブ出力とパワー室間を遮断した上で、パワー室の圧力を制御する。

回生と油圧ブレーキの協調制御時は、パワー室圧をリザーバに開放する減圧用ノーマルクローズバルブ(NC/V)とレギュレータ出力に対しパワー室側を低圧状態で遮断する減圧用ノーマルオープンバルブ(NO/V)の2本のソレノイドバルブを制御する。ブレーキ操作量以上の加圧制御時は、アキュムレータに蓄圧された高圧をパワー室に導入する加圧用 NC/V とレギュレータ出力に対しパワー室側を高圧状態で遮断する加圧用 NO/V の2本を制御する。Fig. 12 にソレノイドバルブの配置を示す。ソレノイドバルブは、すべてリニアな圧力制御が可能なものとした。

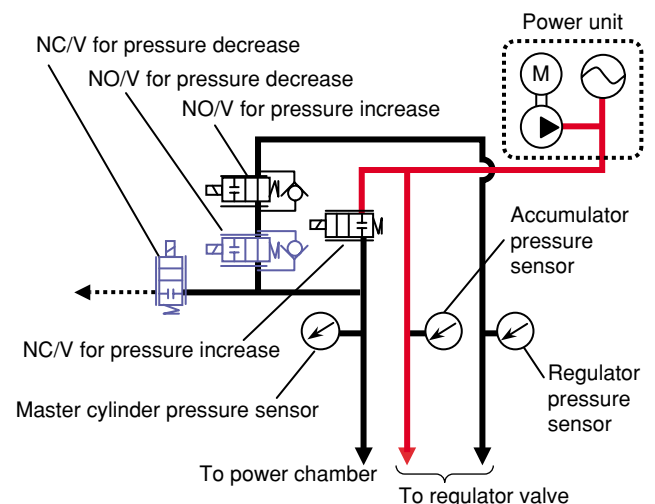


Fig. 12 Layout of solenoid valve

6.2. スライディングモード制御

Fig. 13にスライディングモード制御の概念を示す。制御目標圧と制御圧の偏差の今回値 $e(n)$ と前回値 $e(n-1)$ を状態変数とし、これらを座標軸とする位相平面上に切換直線と呼ばれる関数

$$\sigma(n) = e(n) + s \cdot e(n-1) = 0 \quad (1)$$

を定義する。状態変数の組み合わせとなる状態量を、この切り替え直線上に拘束するように制御する。切り替え直線の傾き s を、 $-1 < s < 0$ の範囲に設定すれば、状態量が位相平面の原点、すなわち偏差 = 0 のポイントに収束し、制御圧が目標圧に追従する。

状態量を切り替え直線に拘束するための制御入力として、状態量を切り替え直線上に拘束させるための等価入力 $U_{eq}(n)$ 、状態量を切り替え直線に載せるための到達則入力 $U_{rch}(n)$ 、モデル化誤差や外乱を抑制して状態量を切り替え直線に載せるための適応則入力 $U_{adp}(n)$ の三つの入力の和を用いる⁽⁹⁾。各制御入力は、以下に示すように導出する。

制御対象となるソレノイドバルブの圧力応答を、離散一次遅れモデルとして定義する。

$$P_{mc}(n+1) = a \cdot P_{mc}(n) + (1-a) \cdot U(n) \quad (2)$$

$P_{mc}(n)$: 制御圧

$U(n)$: 制御入力

a : モデルパラメータ

また、制御目標圧を $P_{ref}(n)$ とおき、偏差 $e(n)$ および切換関数 $\sigma(n)$ を下式で定義する。

$$e(n) = P_{ref}(n) - P_{mc}(n) \quad (3)$$

$$\sigma(n) = e(n) + s \cdot e(n-1) \quad (4)$$

状態量が切換直線に拘束され続ける条件は、

$$\sigma(n+1) = \sigma(n) \quad (5)$$

となるため、等価入力 $U_{eq}(n)$ は(2)から(5)式を $U(n)$ について解くことで求められる。

$$U_{eq}(n) = \{P_{ref}(n+1) - a \cdot P_{mc}(n) - (1-s) \cdot e(n) - s \cdot e(n-1)\} / (1-a) \quad (6)$$

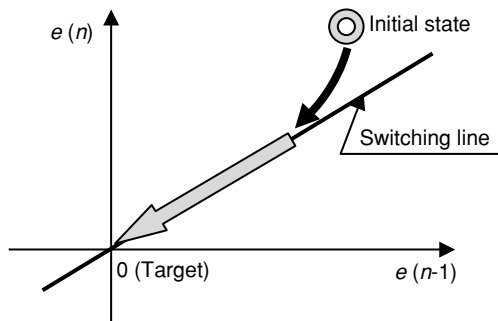


Fig. 13 Sliding mode control outline

到達則入力 $U_{rch}(n)$ は、状態量を切り替え直線に到達させる入力、すなわち $\sigma(n)=0$ とする入力として、 $\sigma(n)$ の比例項とする。

$$U_{rch}(n) = F \cdot \sigma(n) \quad (7)$$

F : 到達則フィードバックゲイン

適応則入力 $U_{adp}(n)$ は、モデル化誤差等による定常偏差をなくすため、 $\sigma(n)$ の積分項として下式で定義する。

$$U_{adp}(n) = G \cdot \sum_{i=0}^n \sigma(i) \quad (8)$$

G : 適応則フィードバックゲイン

制御入力 $U_{in}(n)$ は、以上の3入力の和として求められる。

$$U_{in}(n) = U_{eq}(n) + U_{rch}(n) + U_{adp}(n) \quad (9)$$

6.3. 回生と油圧ブレーキの協調制御

各種走行条件において、ハイブリッドモータが発生可能な回生トルクの範囲内で回生ブレーキを可能な限り利用するように回生と油圧ブレーキの配分が決定される。ブレーキ圧の制御目標値は、レギュレータ室に配置した油圧センサ値から、回生トルク相当の圧力を減算した値となる。レギュレータ圧力は、ドライバの要求制動力に相当する。

ブレーキ圧の制御は、減圧用 NO/V でレギュレータ出力を遮断し、減圧用 NC/V でパワー室圧を減圧する。回生トルクが減少する際は、減圧用 NO/V よりレギュレータ圧をパワー室に導入し、パワー室圧を増圧する。このパワー室の圧力制御が、目標圧への追従性が悪いとドライバの要求通りの制動力が得られなくなる。

パワー室を減圧する際の NC/V 制御、およびパワー室増圧時の NO/V 制御にスライディングモード制御を適用した。各ソレノイドバルブに対して制御パラメータをチューニングした結果、温度変化等の制御対象のモデル化誤差が存在する状態においても、高応答で安定した圧力制御が達成できた。スライディングモード制御の採用により、種々の走行条件においても違和感のないブレーキフィーリングを得ることができた。

Fig. 14に回生と油圧ブレーキの協調制御時の圧力波形を

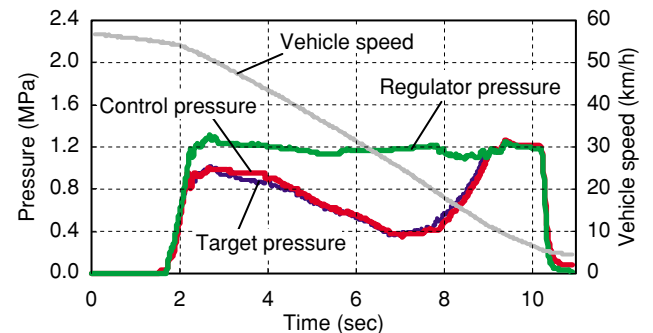


Fig. 14 Braking pressure during cooperative control

示す。レギュレータ圧から回生トルク相当の圧力を減算した制御目標圧は、回生可能トルクの変動にあわせて増減する。この目標圧に対し、制御圧であるパワー室圧が精度よく追従していることがわかる。

6.4. 加圧方向のリニア制御

ドライバのブレーキ操作量以上のブレーキ圧を発生させるニーズに対応するため、前述した加圧用NC/Vと加圧用NO/Vの2本のソレノイドバルブにより加圧方向のリニア制御も実現した。加圧が必要な際は、加圧用 NO/V でレギュレータ出力を遮断し、加圧用 NC/V でアキュムレータ圧をパワー室に導入して加圧する。パワー室圧を減圧する際は、加圧用 NO/V を開弁してレギュレータ室に圧力を解放する。

圧力制御は、回生と油圧ブレーキの協調制御同様スライディングモード制御を採用し、高い制御性能を実現した。

7. 燃費向上効果

開発システムをハイブリッド車両に搭載し、USLA-4 CITY モードで燃費向上効果を確認した。協調制御ができない従来システムでは、ブレーキフィーリングを維持するために回生トルクを制限する必要があり、ハイブリッドモータの回生能力を有効に使いきれなかった。本システムを搭載することで、回生電力を有効に回収することが可能となり、このテスト車両ではモード中の回生電力が従来システム比約 46%増加した。この電力をモータ駆動力に割り当てることでエンジン負荷を低減でき、燃費の向上に寄与できる。

8. まとめ

良好なブレーキフィーリングと高い信頼性を持つ油圧サーボシステムをベースとし、回生と油圧ブレーキの協調制御を始め各種ブレーキ制御機能を実現できるブレーキシステムを開発した。その主要な技術要素を以下にまとめる。

- (1) ストロークシミュレータの特性チューニング、およびレギュレータバルブの2段インレットバルブ構造等により、良好なブレーキフィーリングを実現した。
- (2) パワーユニットモータの駆動回路の冗長化、およびセンサの2系統出力化により高い信頼性を確保した。
- (3) ソレノイドバルブによる圧力フィードバック制御にスライディングモード制御を採用し、精度の高いブレーキ圧制御を実現した。
- (4) 回生と油圧ブレーキの協調制御により、ハイブリッド車の回生電力が46%増加し、燃費の向上に寄与できることが確認できた。

今回ハイブリッド車のニーズに対応するシステムとして開発したが、ブレーキ圧の任意な制御は、今後要求が増す各種ブレーキ制御機能に対応できるものである。本システム

は、ハイブリッド車のみならず、各種車両のブレーキ性能向上、機能拡大に寄与できるものである。

参考文献

- (1) Ogura, M., Aoki, Y., Mathison, S. : The HONDA EV PLUS Regenerative Braking System, EVS14(1997)
- (2) Otomo, A., Sakai, A., Takasu, T., Nakamura, K. : Development of Regenerative Braking System for Hybrid Vehicle, SAE Paper, No.1999-10-0062
- (3) Jonner, W., Winner, H., Dreilich, L., Schunck, E. : Electrohydraulic brake system --The first approach to brake-by-wire technology, SAE Paper, No.960991
- (4) Nakamura, E., Soga, M., Sakai, A., Otomo, A., Kobayashi, T. : Development of Electronically Controlled Brake System for Hybrid Vehicle, SAE Paper, No.2002-01-0300
- (5) Reuter, D. F., Lloyd, E. W., Zehnder II, J. W., Elliott, J. A. : Hydraulic Design Considerations for EHB System, SAE Paper, No.2003-01-0324
- (6) Song, W., Zheng, Y., Milot, D. : Pressure Control Calibration Time Reduction for EHB Systems, SAE Paper, No.2004-01-0257
- (7) Lii, N., Sturm, S., Coombs, T. A. : A Study on Sensor Fusion for Fault Tolerant Brake-by-Wire Driver Input Design with Dissimilar Sensors, SAE Paper, No.2006-01-1025
- (8) 野波健蔵, 田宏奇: スライディングモード制御, コロナ社, 263p.(1994)
- (9) 安井裕司, 赤崎修介, 上野将樹, 岩城喜久: 触媒後 O₂ フィードバックのための適応スライディングモード制御, HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.1, p.65-71

■ 著 者 ■



青木 康史



鈴木 健二



中野 博士



野尻 欣主