

前後輪独立制御が可能なオンデマンド型 回生協調ブレーキシステム

渡邊 俊哉
Shunya Watanabe

増田 芳夫
Yoshio Masuda

概要

電動車の普及が進んでいるが、ブレーキ分野では、エネルギー回生量を増加し、燃費・電費を向上する技術開発が行われている。本稿では、前後輪でブレーキ油圧を独立して制御することにより、エネルギーの回生効率を向上する回生協調ブレーキシステムについて紹介する。

1. はじめに

回生協調ブレーキシステムについて説明する。図1に、電気自動車、ハイブリッド車等の電動車における、車両減速時のエネルギー回生について示す。電動車には、燃費・電費が向上されるよう、回生協調ブレーキシステムが搭載されている。電動車では、走行用モータを発電機として使用し、減速時の運動エネルギーが電気エネルギーに変換されて回収される。発電機により発生するブレーキ力が“回生ブレーキ”である。

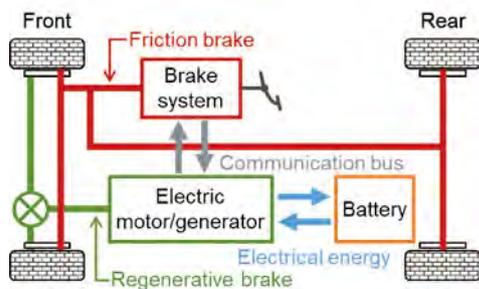


図1 電動車におけるエネルギー回生

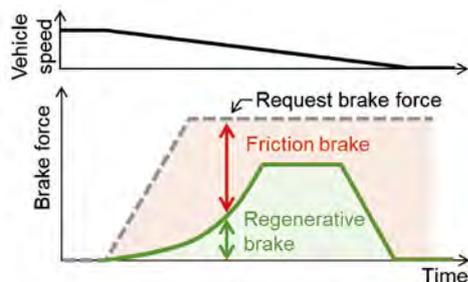


図2 回生協調制御の概要

図2に示すように、回生ブレーキは、車速、バッテリー充電量等に応じて変化する。回生ブレーキが利用できる範囲では、エネルギーを効率的に回収するために、ブレー

キ油圧による摩擦ブレーキを発生させないことが望ましい。回生ブレーキがドライバーの要求に対して不足する場合には、その不足分が、回生協調ブレーキシステムによる摩擦ブレーキで補われる。このように、回生ブレーキに応じてブレーキ油圧を調整することが“回生協調制御”と呼ばれている。回生協調制御を行う回生協調ブレーキシステムでは、ドライバーの操作に依存することなく、任意に油圧を制御できるよう、ブレーキペダル操作とブレーキ油圧の発生とが分離された構成が用いられる。これが、ブレーキバイワイヤ構成である。

さらに、図3に示すように、回生協調ブレーキシステムは、電子制御ブレーキシステム（以下、ECB：Electronically Controlled Brakeと呼ぶ）とESC(Electric Stability Control)モジュレータとの組み合わせで構成される。回生協調ブレーキシステムでは、ECBにより、回生協調制御を含むサービスブレーキ機能が発揮される。また、ESCモジュレータでは、アンチロックブレーキ制御、横滑り防止制御等が実行される。くわえて、ECBの故障時には、ESCモジュレータによりフェールオペレーションが行われる。回生協調ブレーキシステムは、独立した2つの加圧ユニットを持ち、それらが通信を介して相互監視することで、ブレーキ機能の冗長性を確保する。これにより、回生協調ブレーキシステムは、将来の自動運転（レベル3以上）にも対応することができる。



図3 回生協調ブレーキシステムの構成

2. 前後輪独立制御による回生協調制御

エネルギー回生効率、および、乗り心地の2つの側面で、前輪油圧と後輪油圧とを独立して制御する前後輪独立制御の有用性について説明する²⁾³⁾。

2.1 エネルギー回生量の増大

回生協調制御では、回生ブレーキを優先して使うことでエネルギーの回生効率が高まる。従来のECBでは、4輪のすべてで、同じ油圧を発生させていた（以下、4輪同圧制御と呼ぶ）。4輪同圧制御では、制動時の車両安定性を確保するよう、前輪／後輪の制動力配分を所定範囲に維持することが必要になる。このため、回生ブレーキの発生が制限されることがある。

これに対して、前後輪独立制御では、制動力配分のために回生ブレーキが制限されることがない。図4に、4輪同圧制御と前後輪独立制御との比較を示す。前後輪独立制御では、前輪油圧を減らして回生ブレーキの割合を高めることができるため、燃費・電費がさらに向上できる。具体的には、前後輪独立制御により、4輪同圧制御と比較して、約2%の電費向上が可能である。

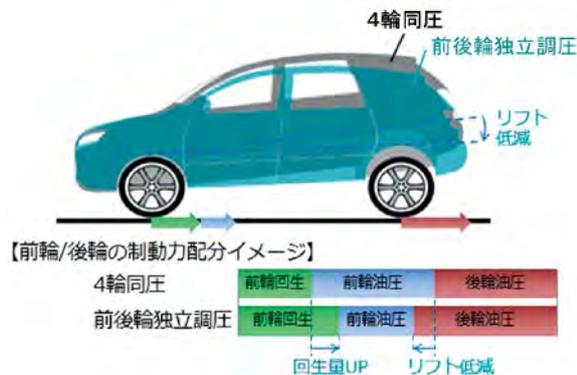


図4 4輪同圧制御と前後輪独立制御との比較

2.2 乗り心地の向上

くわえて、前後輪独立制御は、車両の姿勢制御にも貢献し、乗り心地や安心感を向上させることができる。制動時には、減速度により車体前方が沈み込み、乗員は前のめりになるが、停止する際に縮んだサスペンションが元

に戻るため、前のめりだった乗員は“カクン”と不快な反動を体感することがある。前後輪独立制御では、より繊細に制動力配分を調整できるため、停止時に摩擦ブレーキの解除具合に配慮した、なめらかなブレーキが実現される。また、後輪油圧を高めることで車体後方の浮き上がり（リフト）が抑えられるため、車両の姿勢変化を低減することもできる。前後輪独立制御により、回生効率のレベルアップだけでなく、減速停止時における車両姿勢の安定化が図られる。

3. ECBでの前後輪独立制御の具現化

前後輪独立制御を具現化できる構成と制御方法、および、その構成を採用するにあたり留意すべき点について説明する⁴⁾。

3.1 ECBの構成

図5に、前輪に走行用モータを備える電動車向けに新規開発されたECBの概略図を示す。ECBは、マスタシリンダ、入力ピストン、出力ピストン、ストロークシミュレータ、パワーサプライユニット、ストロークセンサ、油圧センサ、および、電子制御ユニット（以下、ECU：Electronic Control Unitと呼ぶ）で構成される。

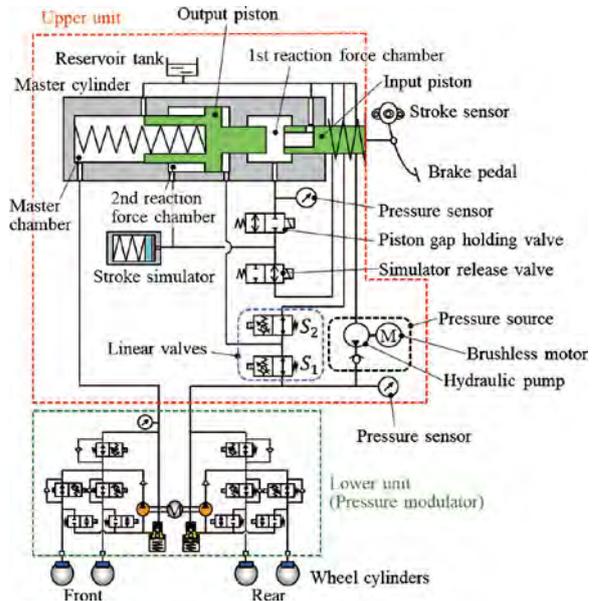


図5 新規開発されたECBの概要

マスタシリンダには、ブレーキペダルに連動する入力ピストン、および、出力ピストンが挿入され、第1、第2反力室、サーボ室、および、反力室が形成される。第1反力室と第2反力室とが接続される流体路には、ピストン隙間保持バルブが配置される。また、この流体路は、シミュレータ開放バルブを介して、リザーバタンクに接続される。ECBの作動時には、ピストン隙間保持バルブは開けられ、シミュレータ開放バルブは閉じられている。ブレーキペダルが操作されると、第1反力室のフルードが圧縮

されるので、第2反力室に接続されているストロークシミュレータによってブレーキペダルの操作力が発生される。

パワーサプライユニットは、大流量ギアポンプ、ブラシレスモータ、および、2つのノーマルオープン型リニアバルブで構成される。パワーサプライユニットは、制動要求がある場合に作動するオンデマンド型である。パワーサプライユニットでは、ギアポンプが発生するフルードの循環流に、2つのリニアバルブが直列に配置されている。これらのリニアバルブが個別に制御されることで、前後輪独立制御が具現化される。2つのリニアバルブのうちで、ギアポンプの吐出側に位置するバルブをS₁バルブと、吸引側に位置するバルブをS₂バルブと、夫々呼ぶ。循環流は、2つのリニアバルブの間で、マスタシリンダのサーボ室に接続される。サーボ室に対向するマスタ室は、前輪ホイールシリンダに接続されている。また、循環流は、ギアポンプの吐出部とS₁バルブとの間で、後輪ホイールシリンダに接続される。

制動要求がある場合に、ECUにより、ブラシレスモータ、および、リニアバルブが制御される。ECUでは、ストロークセンサにより検出されたブレーキペダルの操作量に基づいて、前輪、後輪油圧の目標圧が決定される。そして、油圧センサにより検出された前輪、後輪油圧が、それらの目標圧に一致するように、ブラシレスモータ、および、リニアバルブが駆動される。

3.2 前後輪独立制御の概要

図6に、前後輪独立制御におけるフルードの流れを示す。ブラシレスモータが駆動されると、フルードはリザーバタンクから吸い込まれると同時に、2つのリニアバルブを流れるフルードの循環流が発生する。リニアバルブに給電が行われていない場合には、リニアバルブは全開状態であるため、その上流側と下流側との差圧は発生しない。リニアバルブに電流が供給されると、リニアバルブの開度が狭められ、循環流が絞られ、差圧が発生する。そして、電流が増加されると、差圧は増加する。

前輪目標圧P_{fr}、および、後輪目標圧P_{rr}を実現するために必要なギアポンプの吐出流量Q_tは、以下の式(1)で表される。ブラシレスモータは、Q_tに応じて駆動される。

$$Q_t = \max(Q_f + Q_r, 0) + Q_s \quad (1)$$

Q_fはP_{fr}を達成するために前輪ホイールシリンダに流すべき流量、Q_rはP_{rr}を達成するために後輪ホイールシリンダに流すべき流量、Q_sはS₁、S₂バルブが機能するために最低限必要なリリーフ流量である。

P_{fr}を実現するために必要なS₂バルブでの差圧ΔP₂、および、P_{rr}を実現するために必要なS₁バルブでの差圧

ΔP₁は、式(2)(3)で求められる。そして、S₁、S₂バルブへの供給電流が、あらかじめ設定されている差圧-電流マップから算出され、これらの供給電流によりΔP₁、ΔP₂が調整される。

$$\Delta P_2 = P_{fr} \quad (2)$$

$$\Delta P_1 = P_{rr} - P_{fr} \quad (3)$$

パワーサプライユニットでは、制動時には、ギアポンプからフルードの流れが常時供給される。また、S₁、S₂バルブでは、それらが閉じられることなく、常にフルードがリリーフされている。フルードの循環流を利用したリニアバルブの直列配置構成では、制御の切り替えが発生しないため、油圧の連続性が保たれる。これにより、前後輪独立制御をシームレスに実現することができる。

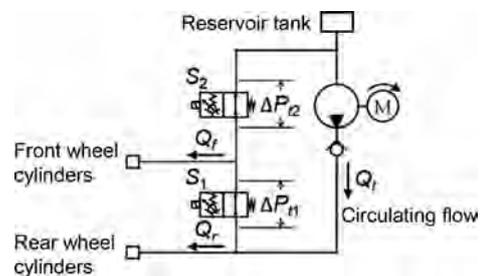


図6 前後輪独立制御でのフルードの流れ

3.3 流量干渉の抑制

リニアバルブの直列配置構成では、前輪系統と後輪系統との間における流量干渉が考慮されなければならない。図7に、流量干渉によって発生する油圧変動の例として、车速の低下に伴い回生ブレーキが徐々に減少し、その減少分を前輪油圧で補う状況が示されている。前輪ホイールシリンダの増圧開始タイミングで、後輪ホイールシリンダで過増圧が発生するとともに、前輪ホイールシリンダで増圧の遅れが発生している。このように、流量干渉により、一系統の調圧が他系統の調圧に影響を与えてしまう状況が発生する。

図8に、流量干渉の発生原因を示す。後輪油圧をほぼ一定に維持した上で前輪油圧を増加させる場合には、図8(a)に示すように、後輪ホイールシリンダに最低限の流量が供給され、ギアポンプが吐出する流量のほとんどが前輪ホイールシリンダに供給されることが要求される。しかしながら、S₁バルブの開度が不足すると、図8(b)に示すように、前輪ホイールシリンダに送り込むべき流量が、後輪ホイールシリンダに不必要に流れてしまう。これにより、図7に例示したような油圧変動が生じる。

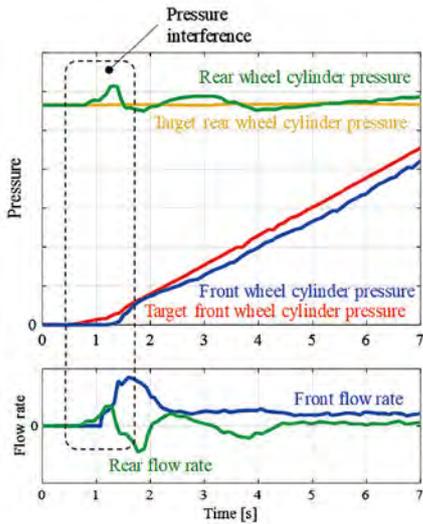


図7 流量干渉による油圧変動

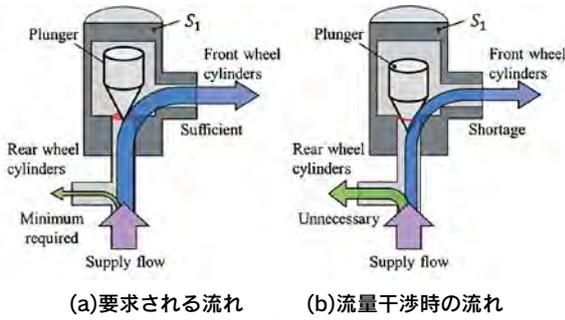


図8 流量干渉の原因

流量干渉の原因となる S_1 バルブの開度不足を解消するよう、目標差圧の演算において、 S_1 バルブのリリーフ流量を考慮した補正を行う。具体的な補正方法を以下に示す。まず、 S_1 バルブの目標リリーフ流量 Q_1 、および、 S_2 バルブの目標リリーフ流量 Q_2 を式(4)(5)により求める。

$$Q_1 = \max(Q_f, 0) + \max(-Q_f, 0) + Q_s \quad (4)$$

$$Q_2 = \max(-Q_r, 0) + \max(-Q_r, 0) + Q_s \quad (5)$$

次に、式(4)(5)から算出された Q_1 、 Q_2 、および、あらかじめ設定されている流量-差圧補正マップに基づいて、補正差圧 $\Delta P_1'$ 、 $\Delta P_2'$ を算出する。最後に、 $\Delta P_1'$ 、 $\Delta P_2'$ に基づいて、 S_1 バルブのリリーフ流量が補正された最終的な目標差圧 ΔP_{t1} 、 ΔP_{t2} を式(6)(7)で決定する。

$$\Delta P_{t1} = P_{tr} - P_{tf} + \Delta P_1' \quad (6)$$

$$\Delta P_{t2} = P_{tr} + \Delta P_2' \quad (7)$$

図9に、循環流の上流側に位置する S_1 バルブのリリーフ流量を考慮した油圧制御の結果を示す。前後輪独立制御では、 S_1 バルブの開度が最適化されるため、流量干渉による油圧変動が抑制されている。このため、リニアバルブの直列配置構成において、流量干渉の影響が抑制され、円滑な油圧制御が実現される。

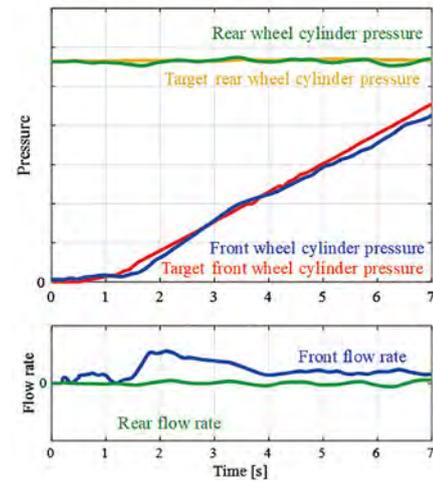


図9 リリーフ流量を考慮したリニアバルブ制御

4. おわりに

本稿では、エネルギー回生効率を向上する前後輪独立制御が実行可能なオンデマンド型の回生協調ブレーキシステム(特に、ECB)について紹介した。

開発した主要技術は、以下のとおりである。

- (1) ギアポンプからの循環流に直列配置されたリニアバルブを用いたシームレスな油圧制御
- (2) 油圧および流量の両方を考慮したブラシレスモータおよびリニアバルブの駆動制御

新規開発した回生協調ブレーキシステムは「トヨタbZ4X」に採用され、電動車向けに順次展開されている。

参考文献

- 1) 遠藤 亮祐, 石田 康人, “環境対応車向け電子制御ブレーキシステムの開発”, AISIN TECHNICAL REVIEW Vol.26,2022
- 2) 株式会社アイシン “AI Think”, <https://www.aisin.com/jp/aithink/innovation/blog/005665.html>, 2022
- 3) 株式会社アドヴィックス 2022.5.12.付けNews Release
- 4) Watanabe, S., Yamamoto, T., Masuda, Y., and Yamakita, H., “Electronically Controlled Brake System with Two-Channel Pressure Control for Electric Vehicles”, SAE Technical Paper, No.2023-01-0663, 2023

筆者



渡邊 俊哉

株式会社アドヴィックス
制御システム技術部
電動車向け回生協調ブレーキ調圧ロジック開発業務に従事



増田 芳夫

株式会社アドヴィックス
制御システム技術部
電動車向け回生協調ブレーキシステム開発業務に従事