

SH-AWD 用ダイレクト電磁クラッチの制御技術

Control Technology of Direct Electromagnetic Clutch Employed in SH-AWD System

國井 力也*

Rikiya KUNII

岩崎 明裕*

Akihiro IWAZAKI

菅野 裕*

Yutaka KANNO

関谷 重信*

Shigenobu SEKIYA

要 旨

SH-AWD システムは、四輪への伝達駆動力を連続的に可変制御する 4WD システムで、車両の運動性能を画期的に高めることができる。本システムの主要技術としてダイレクト電磁クラッチがある。それは従来の電磁クラッチに対し制御精度の向上を目的として開発し、リアドライブユニットに搭載されている。

ダイレクト電磁クラッチは、ソレノイドの磁路となる磁性材にエアギャップを設け、そこに生じる吸引力をクラッチ推力に変換する機構であり、従来の電磁クラッチで使用している倍力機構は介在しない。よって直接クラッチに推力が作用するため制御精度が向上する。ただし、クラッチの厚さが変化するのに伴いエアギャップが変化し、ソレノイドの吸引力も変化する。従ってサーチコイルを用いてエアギャップの変化を磁束の変化として捉え、常に適切な吸引力が発生するように電流を補正制御している。また検出精度を向上させる手法を工夫し、より高精度な伝達駆動力の制御を可能としている。

ABSTRACT

The SH-AWD system is a 4WD system providing continuously variable control of the torque transmitted to all four wheels to radically enhance vehicle dynamic performance. The core of the system is a direct electromagnetic clutch positioned in the rear drive unit. This new clutch was developed to enable more precise control than is possible in a conventional electromagnetic clutch. In the direct electromagnetic clutch, there is an air gap between the magnetic materials, that form the solenoid magnetic circuit. The solenoid force generated across this gap is converted into clutch thrust, without the need for the torque amplifier employed in conventional electromagnetic clutches. The fact that thrust acts directly on the clutch increases the precision of control. However, the size of the air gap changes when the thickness of the clutch changes, and this causes change in the solenoid force. A search coil is therefore used to detect changes in the size of the gap as changes in magnetic flux, enabling the current to be corrected in order to ensure that the appropriate solenoid force is consistently generated. In addition, measures to increase the accuracy of detection have enabled more precise control of torque transmission.

1. はじめに

SH-AWD システムは、ドライバの操作と車両の状態に応じて四輪への伝達駆動力をバリエーションに制御することで、車両の旋回性能および安定性に代表される運動性能を向上させることができる⁽¹⁾。

上記性能を満足させるため、リアドライブユニットに搭載される電磁クラッチは、ヒステリシスの低減など高いトルク制御精度が求められる。従来の電磁クラッチでは倍力機構としてボールランプを使用しているが、そのガタによる作動回転角までの応答遅れや引き摺り荷重などがトルク

制御精度に影響する⁽²⁾。ダイレクト電磁クラッチでは、それらを排除しつつトルクを増幅できる機構として、新たにプラネタリギヤを採用している。

また従来の電磁クラッチは、磁路となる磁性材の間にクラッチ板を挟む構造であるため、クラッチ板は磁束が通過する磁路の一部を構成している。そのためクラッチ板に非磁性材であるパーパ系の摩擦材を採用できず、鉄系のクラッチ板が用いられる。その結果、摩擦特性を安定させるため、クラッチ板に特殊な表面処理が必要である⁽³⁾。また、クラッチ板はトルクを伝達する強度部材であるため、磁気特性に優れた純鉄とすることができない⁽⁴⁾。

*栃木研究所

以上の課題を解決するため、ソレノイド外周の磁性材にエアギャップを設け、磁性材に発生する吸引力を磁路の外側に配置したクラッチの推力としている。その結果、磁路を純鉄で構成することと、クラッチ板にペーパー系の摩擦材を採用することを可能としている。

しかしながら、クラッチの摩耗等によってエアギャップが変化すると、それに応じて吸引力が変化する。そのため高精度に駆動力を制御するには、エアギャップの変化を検出し、吸引力を補正する必要がある。本稿では、エアギャップ変化の検出、吸引力の補正制御および制御精度の向上手法について述べる。

2. ダイレクト電磁クラッチ

ダイレクト電磁クラッチの構造を Fig. 1 に示す。メインコイルを内蔵した磁性材のヨークは、同じく磁性材のアーマチュアとの間にエアギャップが設けられる。メインコイルへの通電に伴いヨークはソレノイドとして機能し、アーマチュアを吸引する荷重が発生する。この吸引力はプッシュ・シリンダを介してクラッチに伝達され、ケースとハブの間にトルクが発生する。

この構造においてクラッチ板の厚さに摩耗等で変化が生じると、エアギャップも変化する。その場合、電流とソレノイド荷重の相関が変化し(Fig. 2)、補正しない場合、高精度な制御ができない。

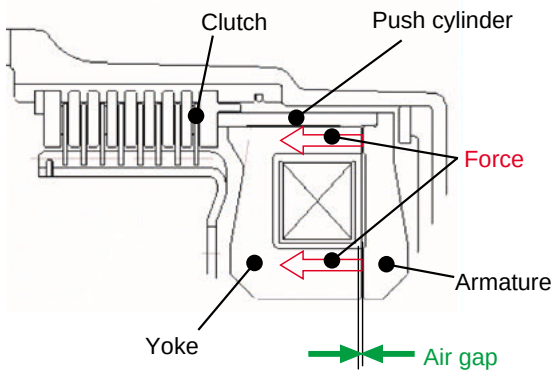


Fig. 1 Cross-section of direct electromagnetic clutch

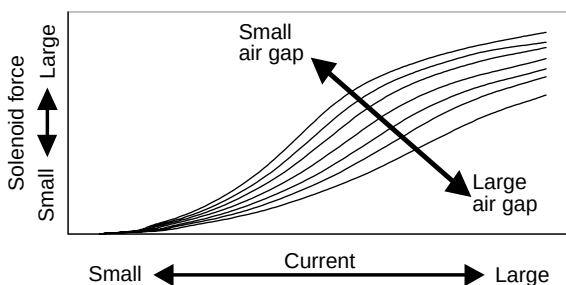


Fig. 2 Current-solenoid force characteristic

3. エアギャップの検出

ダイレクト電磁クラッチのアーマチュアとヨーク間に発生する吸引力は(1)式で表され、Fig. 3に示すように吸引力はエアギャップに反比例する。

$$F = 10^7 S \mu_0^2 U^2 / 8\pi / \delta^2 \quad (1)$$

F : 吸引力 S : 磁路断面積

μ_0 : 真空の透磁率($4\pi \times 10^{-7}$)

U : 磁界の強さ

δ : エアギャップ

また磁路断面積は(2)式で表され、Fig. 4 に示すように吸引力は磁束に比例する。

$$S = 8\pi F / 10^7 / B^2 \quad (2)$$

B : 磁束

従って磁束を検出することでエアギャップが検出できる。

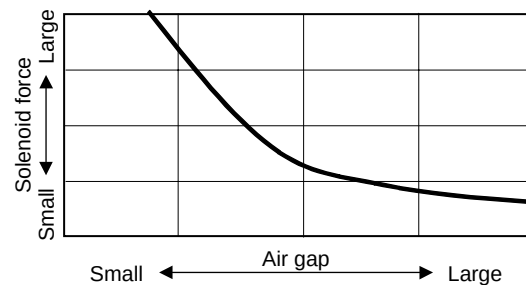


Fig. 3 Air gap-solenoid force characteristic

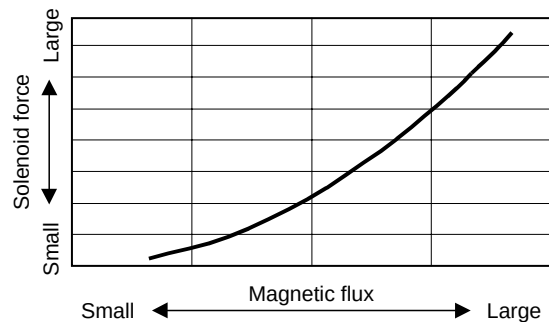


Fig. 4 Magnetic flux-solenoid force characteristic

4. 磁束の検出

磁束の検出にはサーチコイルを用いる(Fig. 5)。サーチコイルの位置は、製造上メインコイルと一体化する⁽⁵⁾ことと、磁路を流れる磁束の影響を受けやすいことを考慮し、ヨークの内側に設定する(Fig. 6)。

検出原理は(3)式のファラデーの法則を用いる。

$$e = N_s d\phi / dt \quad (3)$$

e : サーチコイル起電圧

N_s : サーチコイル巻数

ϕ : サーチコイル周囲の磁束

ここから時間軸の磁束の変化に伴ないサーチコイルに起電圧が発生することがわかる。

(3)式を時間で積分すると(4)式が得られる。

$$\phi = \int e dt / N_s \quad (4)$$

メインコイル電流を変動させてサーチコイル周囲の磁束を変化させ、サーチコイルに起電圧を発生させる(Fig. 7)。図中の積分した面積が(4)式の右項を表す。これをサーチコイル巻数で除して磁束を求めることができる。

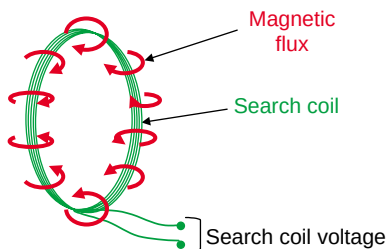


Fig. 5 Search coil concept

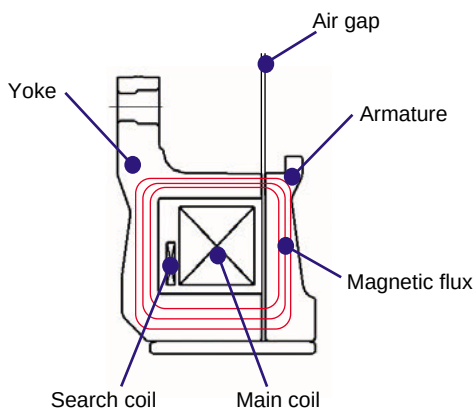


Fig. 6 Layout of magnetic circuit and search coil

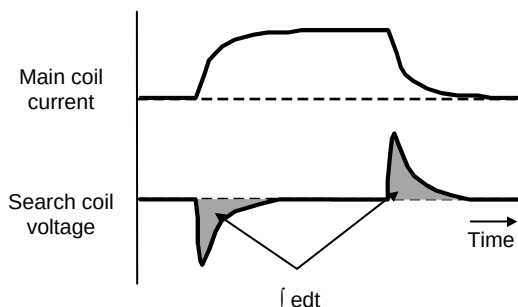


Fig. 7 Voltage during DC current control

5. 吸引力の補正制御

続いて吸引力の補正制御手法について述べる。まず磁束—電流—トルクの3次元テーブル(Fig. 8)をECUに設ける。

検出した磁束に基づき上記3次元テーブルより目標トルク—電流値テーブルを選択する。これを基に目標トルクに対する電流値を求め、制御を実行する(Fig. 9)。

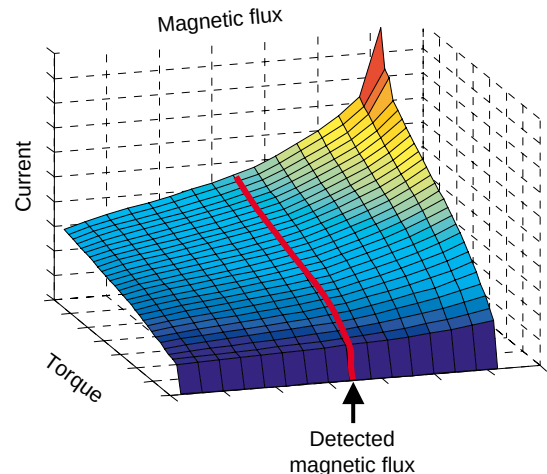


Fig. 8 Current-torque-magnetic flux table

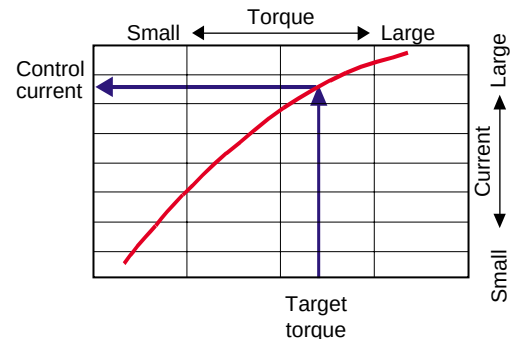


Fig. 9 Current-torque table

6. 制御精度の向上技術

6.1. PWM 制御の影響

Fig. 7 は直流電流における計測結果であるが、実際の電流制御は PWM 制御(Pulse Width Modulation control)である。電流を PWM 制御する間は、磁束変動に起因してサーチコイル電圧が振動し精度が悪化する。

従って一定電流を PWM 制御した後、電流をオフし、磁気インダクタンスに応じて電流が緩やかに低下する領域をサンプリングする事にした(Fig. 10)。サーチコイル電圧は振動することなく緩やかに変化しており、積分面積が安定的に得られるため、磁束検出精度を向上することができる。

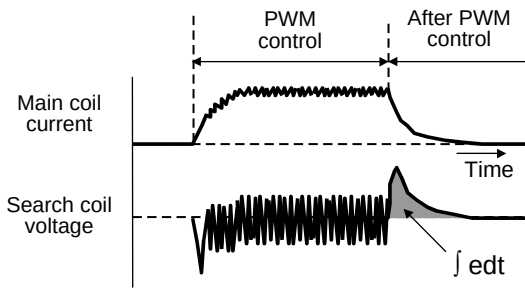


Fig. 10 Voltage during PWM current control

6.2. ECU 基準電圧の影響

ECU がサーチコイル電圧を A/D 変換する際のサンプリング周期を θ とすると、(4)式は(5)式により表すことができ、Fig. 11 に示すように電圧の積分が実行される。

$$\phi = \int \text{edt} / N_s \quad \theta \Sigma e / N_s \quad (5)$$

θ : サンプリング周期

基準電圧は ECU 個体毎に異なり、同一 ECU においても環境温度の変化に伴い変動する。従ってサーチコイル電圧を検出する時に、ECUの基準電圧とサーチコイルのゼロ電圧とのオフセット電圧が誤差として含まれる(Fig. 12)。そこでサーチコイル電圧を検出した直後に、検出時間と同じ時間サーチコイル電圧を積分し(Fig. 13)、式(6)によりその積分値を検出時の積分値から差し引くことにした。

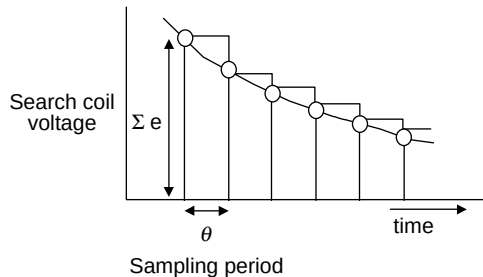


Fig. 11 Sampling period of search coil voltage

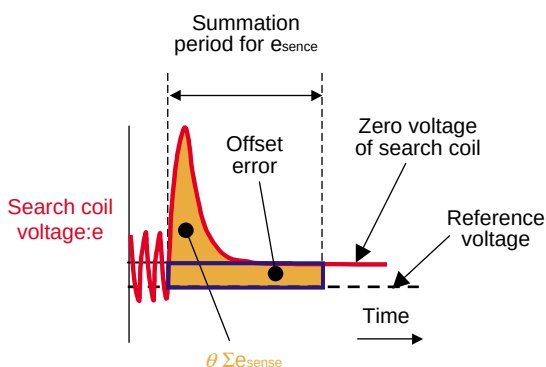


Fig. 12 Offset voltage error of search coil

$$\phi = \theta (\Sigma e_{\text{sense}} - \Sigma e_{\text{zero}}) / N_s \quad (6)$$

e_{sense} : 計測電圧積分値

e_{zero} : 補正電圧積分値

これにより ECU 基準電圧のばらつきの影響を排除することができ、磁束検出精度を向上することができる。

6.3. 磁路ギャップ部形状の影響

磁路ギャップ部の形状違いでの、エアギャップに対する吸引力特性の確認をした。磁路形状はギャップ部が 30°テーパ、45°テーパ、フラットの3種類を検討した(Fig. 14)。

エアギャップに対する吸引力の実測結果Fig. 15から、フラットタイプはテーパタイプに対し、エアギャップ変化に対する吸引力変化が急峻なことがわかる。すなわちエアギャップが小さくなるほど、目標吸引力に対して決定される電流が小さくなる。そのため、吸引力の電流分解能が低下

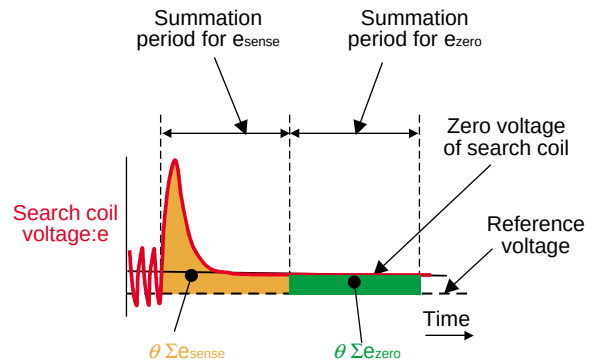


Fig. 13 Zero correction of search coil voltage

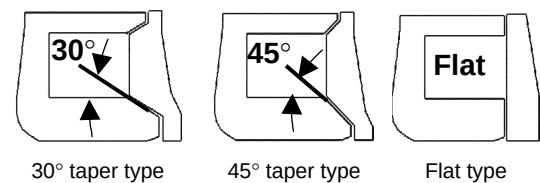


Fig. 14 Gap profile of magnetic circuit

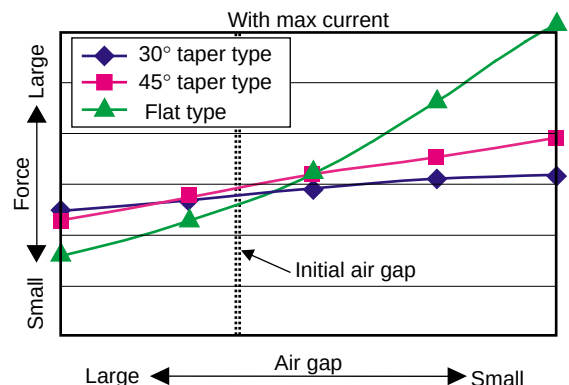


Fig. 15 Air gap-solenoid force characteristic

し、電流誤差による吸引力誤差が増加しやすい。また磁束測定時のサーチコイル電圧は ECU の許容範囲内で可能な限り大きくすることが電圧分解能からは望ましいが、エアギャップ変化後の電流に対する磁束およびサーチコイル電圧の上昇を考慮して初期から小さな電流で磁束を測定せざるを得ないため、電流分解能が低下し磁束検出誤差が増加しやすい。以上より磁路ギャップ部形状はテーパタイプを選択することで、磁束検出精度と吸引力制御精度を向上させることができる。テーパ角度は初期ギャップ時において吸引力が大きい 45° としている。

6.4. サーチコイルの設定位置の影響

45° テーパータイプの磁束密度分布を磁気シミュレーションした(Fig. 16)。磁気解析ソフトは ELF 社製 ELF/MAGIC を用いた。

その結果、エアギャップ部の近傍は磁束分布の変化が大きいことがわかった。これはエアギャップ部から漏れた磁束の影響と考えられる。そこでエアギャップより遠い位置にサーチコイルを設定することで、安定的な磁界において磁束検出し、磁束検出精度を向上することが可能になる(Fig. 17)。

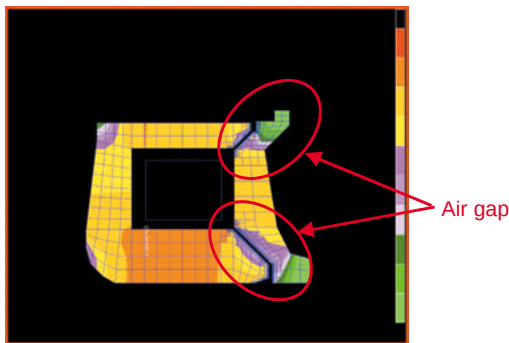


Fig. 16 Magnetic flux simulation result

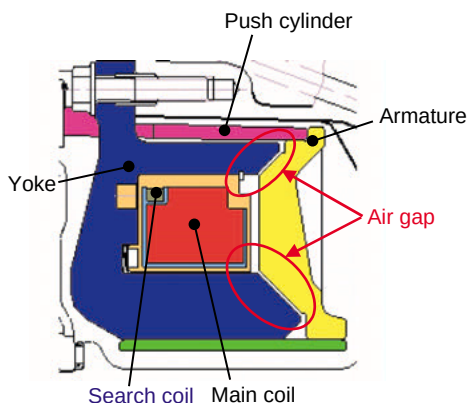


Fig. 17 Layout of search coil

7. 結果

目標トルクと実トルクの相関を、磁束検出による電流補正制御の有無で測定した。Fig. 17 および Fig. 18 は補正制御無しおよび有りの測定結果である。補正制御を加えることで、エアギャップの大小によらず目標トルクと実トルクにより正確な相関が得られた。

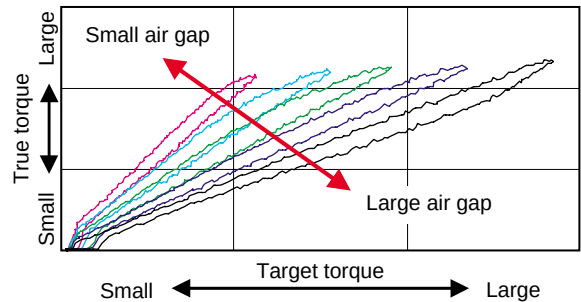


Fig. 18 Torque control result without correction

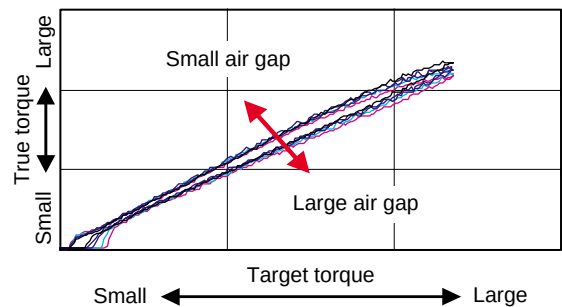


Fig. 19 Torque control result with correction

8. まとめ

サーチコイルを用いた磁束検出と、検出磁束に基づく電流補正制御によって、エアギャップの変化に対する吸引力の補正ができることがわかった。更に制御精度を高める工夫により、より高精度に駆動力制御できることが証明できた。これによりSH-AWDの主要技術としてダイレクト電磁クラッチ技術を確立することができた。

参考文献

- (1) 國井力也, 岩崎明裕, 渥美淑弘, 森淳: 四輪駆動力自在制御システム(SH-AWD)の開発, Honda R & D Technical Review, Vol.16, No.2, p.9-16
- (2) 鈴木浩一, 大葉充, 山本貴史, 宅野博: 乗用車用電子制御 4WD システムの開発, 自動車技術会学術講演前刷集, No.75-98, p.1-4(1998)

- (3) 宅野博, 酒井俊文, 酒井直行, 池田曉彦: 4WD用新電子制御カップリングの開発, 自動車技術会学術講演前刷集, No.75-98, p.5-8(1998)
- (4) 千葉政道, 阿南吾郎: 被削性に優れた純鉄系軟磁性材料(ELCH2S), R&D神戸製鋼技報, Vol.54, No.1, p.117(2004)
- (5) 岩崎明裕, 國井力也: ダイレクト電磁クラッチの要素技術, 自動車技術会学術講演前刷集, No.07-05, p.23-28(2005)

■著 者■



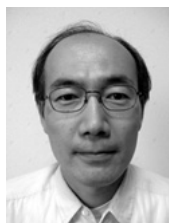
國井力也



菅野 裕



岩崎明裕



関谷重信