

四輪駆動力自在制御システム(SH-AWD)の開発

Development of SH-AWD (Super Handling-All Wheel Drive) System

國井力也*

Rikiya KUNII

渥美淑弘*

Yoshihiro ATSUMI

岩崎明裕*

Akihiro IWAZAKI

森 淳*

Atsushi MORI

要 旨

前後左右輪への駆動力配分を自在に制御する世界初の四輪駆動システム、SH-AWD(Super Handling-AllWheelDrive)を開発した。

上記の制御を可能にするため、ソレノイドの吸引力をクラッチに直接作用させるダイレクト電磁クラッチを新たに考案した。また、あらゆる条件での制御を可能とするため、クラッチの差回転を調整する増速機構を開発した。

本システムを車両に適用することで、後輪の駆動力左右差を使った旋回ヨーモーメントの直接制御により、ステアリング操作に忠実な旋回特性や高い車両安定性を実現することができた。さらに前後輪への駆動力配分差を加えて四輪の負荷率を均等化することにより、旋回限界性能を向上させた。

ABSTRACT

In a world first, Honda has developed the SH-AWD (Super Handling-All Wheel Drive) system, enabling complete control of torque distribution to any wheel, front or rear, left or right.

A direct electromagnetic clutch in which solenoid attraction acts directly on the clutch was newly developed to enable the system to be realized. In addition, a 2-speed shift unit was developed to adjust differential revolutions in the clutch in order to enable the system to exert control under all conditions.

The use of this system in a vehicle provided incredibly neutral steering and high vehicle stability by direct control of turning yaw moment through differential distribution of torque to the right and left wheels. And the vehicle has enhanced cornering limit performance by equalization of the load ratio between the wheels through differential distribution of torque to all four wheels.

1. 開発コンセプト

近年、車両の高出力化に伴い、駆動形式は2WDから4WDへ移行傾向にある。従来の4WDシステムには様々な形式が考案・実用化されてきたが、一般に運動性能を重視した4WDは駆動走破性が低く、駆動走破性を重視した4WDは旋回性能を向上させづらい。それらの課題を解決するため、電子制御で駆動力を前後配分、または後輪駆動力を左右配分するシステムが考案・実用化されている⁽¹⁾。しかしながら、前後と後輪左右の駆動力を両方とも自在に変えられるシステムは存在しなかった。

β -Method解析⁽²⁾の結果から旋回性能と安定性の向上には、駆動力左右差を用いてヨーモーメントを直接制御する事が有効であり、1997年に車両に搭載したActive Torque Transfer System(ATTs)⁽³⁾にて実証されている。

今回、4WDの高い駆動性能をベースに、旋回性能および安定性を極限まで高めるため、前後と左右の駆動力を自在

に制御する世界初の四輪駆動システム、SH-AWDを開発した。本システムは、左右の駆動力差でヨーモーメントを直接制御することにより、旋回中のアクセル操作による車両の挙動変化を抑制する。またエンジントルクや前後加速度に応じて前後の駆動力を配分することにより、急なアクセル操作によるタイヤのスリップを低減する。

本システムを今年秋発表した新型LEGEND/ACURA RLに搭載検討するにあたり、走行状況や路面状態に応じた慎重なアクセル操作およびハンドル操作の修正を低減し、運転におけるドライバの負担を軽減することを狙いとした。そこでSH-AWDの開発コンセプトをドライバの意志に忠実な旋回特性となる『ニュートラルステア・フィール』の実現と定めた。

2. 駆動力の制御理論

後輪左右の駆動力配分および前後輪間の駆動力配分が可能なシステムを用いると運動性能が向上する。なぜなら

* 栃木研究所

ヨーモーメントの直接制御に加えて四輪のタイヤ負荷を均等化することができるからである。以下に理論を述べる。

2.1. 左右駆動力差の効果

2.1.1. ヨーモーメント制御

基本となる制御則は式(1)および式(2)によって与えられる。前後加速度や横加速度に応じ後輪左右の駆動力を制御し、加減速における車両挙動の変化(アンダーステアおよびオーバーステア)を低減できる⁽⁴⁾。

$$X_1 = \left(\frac{D_R}{2} + \frac{h}{tr} \cdot \frac{Y_G}{g} \right) \cdot \frac{W \cdot X_G}{g} \quad (1)$$

$$X_2 = \left(\frac{D_R}{2} - \frac{h}{tr} \cdot \frac{Y_G}{g} \right) \cdot \frac{W \cdot X_G}{g} \quad (2)$$

$X_1(X_2)$: 後輪外輪(内輪)駆動力

D_R : 後軸駆動力配分比

W : 車重

Y_G : 横加速度

X_G : 前後加速度

g : 重力加速度

h : 重心高さ

tr : 後輪トレッド

2.1.2. 前輪コーナリングフォースの低減

旋回中に車体へヨーモーメントを与えることにより、前後輪のコーナリングフォースが変化する。この状態の模式図を Fig. 1、前後輪のトータルコーナリングフォースを式(3)および式(4)に示す。前輪のトータルコーナリングフォースは M/I 減少し、後輪では M/I 増加する。

$$CF1 = \frac{b}{l} F - \frac{M}{l} \quad (3)$$

$$CF2 = \frac{a}{l} F + \frac{M}{l} \quad (4)$$

$CF1(CF2)$: 前輪(後輪)トータルコーナリングフォース

M : 左右駆動力差によるヨーモーメント

F : 遠心力

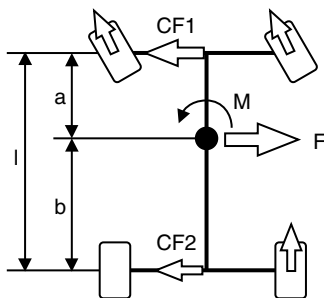


Fig. 1 Change of cornering force

2.1.3. コーナリングフォースの増大

従来の駆動システムでは、左右輪に駆動力を等配分する。その結果、特に内輪側ではタイヤの摩擦力が主に駆動力に使われ、小さなコーナリングフォースしか発生できない。

旋回外輪に内輪より大きな駆動力を配分することにより、内輪も大きなコーナリングフォースを発生できる。

旋回時の駆動力とコーナリングフォースは摩擦円を用いた模式図で示すと以下の様になる。Fig. 2(a)は通常の車両、(b)は SH-AWD 付き車両である。

Fig. 3 に内外輪の駆動力配分比に対するコーナリングフォースを示す。等配分(50:50)に対し駆動力配分を外輪に多くするほど、左右輪トータルのコーナリングフォースが大きくなる。

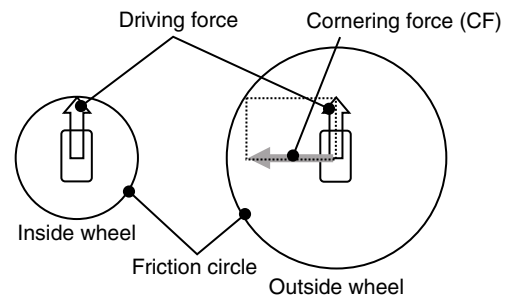


Fig. 2 (a) Tire force for conventional vehicle

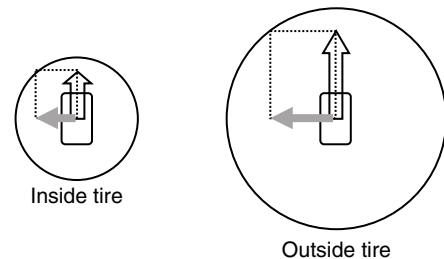


Fig. 2 (b) Tire force for SH-AWD

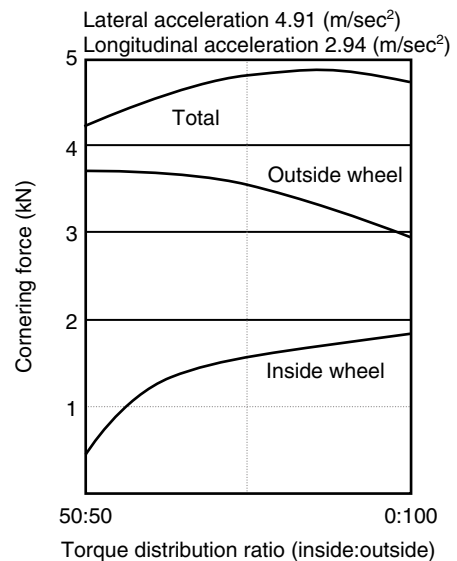


Fig. 3 Effect of torque distribution

2.2. 四輪のタイヤ負荷の均等化

タイヤの接地荷重や発生する力は、加速や旋回の程度により変化する。タイヤの負荷率を、発生し得る最大能力と発生している力の比として式(5)により定義する。

$$\eta = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{\mu \cdot W} \quad (5)$$

η : タイヤ負荷率

F_x : タイヤ駆動力

F_y : タイヤサイドフォース

μ : 路面摩擦係数

W : タイヤ接地荷重

Fig. 4 に旋回横加速度に対するタイヤ負荷率の変化を示す。四輪の負荷率を均等化することで発生できる旋回横加速度を最大限に引き出し、旋回性能を向上できる。

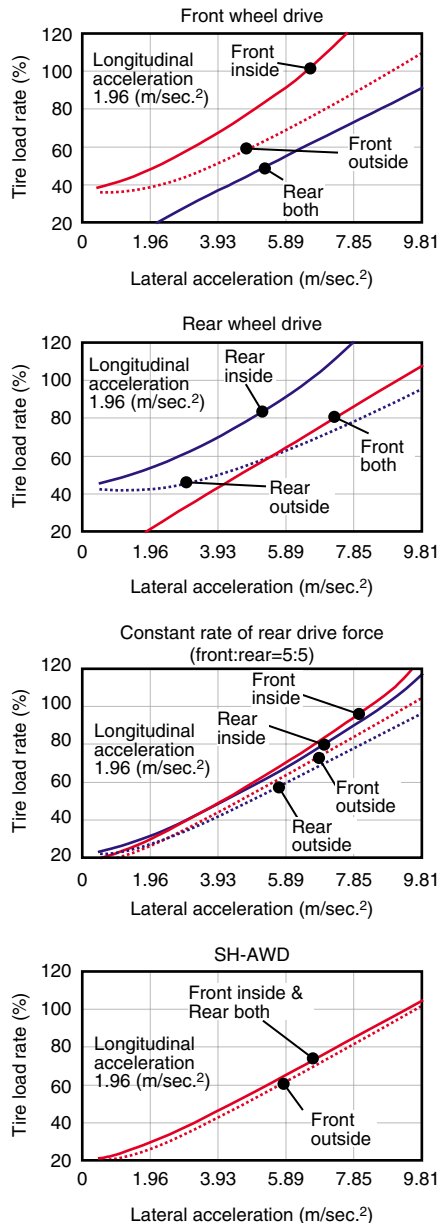


Fig. 4 Load rate of each wheel

3. SH-AWD システム

以下、本システムの原理と制御手法について述べる。

3.1. システム構成

Fig. 5 に車両システムの構成を示す。本システムでは各種センサ情報が、他の ECU から CAN 通信を経由して専用の ECU (SH-AWD ECU)に入力される。専用 ECU はドライバの意志と走行状況を検出し、リアドライブユニットが左右への駆動力配分と、後輪への回転増速を実行する。リアドライブユニットはプロペラシャフト後方に配置され、専用 ECU の指令に基づき制御される。

Fig. 6 にリアドライブユニットの断面図を示す。

旋回時にプロペラシャフトからの入力回転を高める増速機構、増速機構からの入力回転を左右輪の回転に変換するハイポイドギヤ、駆動力を精度良く配分制御する左右一對のダイレクト電磁クラッチから構成される。

旋回加速時の後輪外側に駆動トルクを多く与えることにより、内回りヨーモーメントを発生させアンダーステアを抑える。リアドライブユニットは、後輪軸上に設けた左右2つのクラッチの外側クラッチをより強く圧着することで、駆動力を後輪外側へ多く配分し上記を達成する。

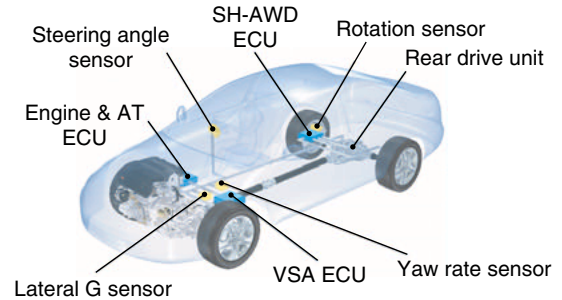


Fig. 5 System layout of SH-AWD system

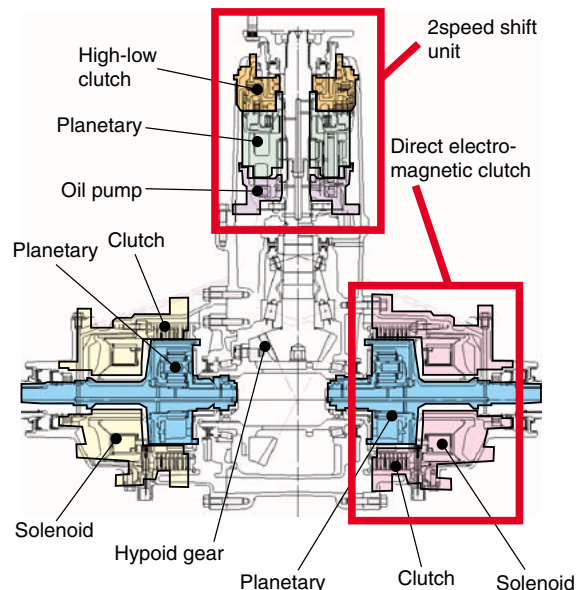


Fig. 6 Cross-section of rear drive unit

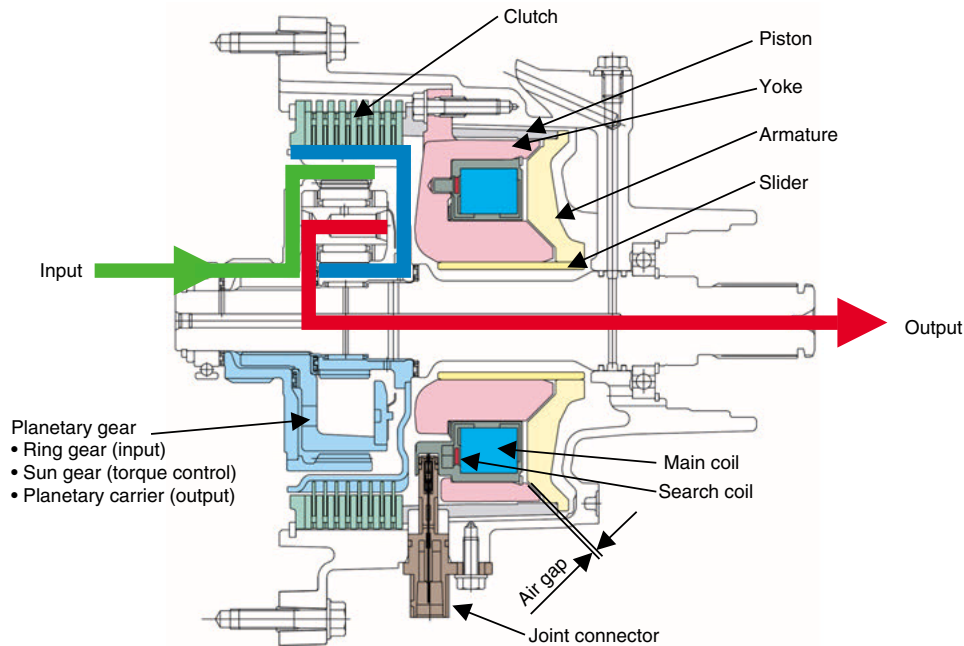


Fig. 7 Direct electromagnetic clutch section

3.2. ダイレクト電磁クラッチ

電磁クラッチは SH-AWD の駆動力を決定しており、低ヒステリシスかつリニアなトルク特性が求められる。そのため吸引力の伝達経路を単純化し、かつ弾性変形を抑えた構造になるように、電磁ソレノイドで発生する吸引力がクラッチにダイレクトに作用する構造とした。

3.2.1. 構造

電磁クラッチの構造を Fig. 7 に示す。磁路はアーマチュアとヨークで構成され、低ヒステリシスな磁性材料を選定した。アーマチュアに圧入されたスライダは、ヨークに対するセンターリング機能を有する。また磁路とならないように非磁性材料とした。ヨークの内側に固定された電磁コイルは通電することで磁界を発生させる。ヨークはサイドケースに固定することにより、磁路間に働く吸引力の反力を受け、アーマチュアに発生する吸引力がピストンを介してクラッチに直接作用する。

プロペラシャフトから伝達されるトルクは、ハイポイドギヤを経由してリングギヤへと伝達される。クラッチはアーマチュアからピストンを介して押しつけられ、ケースとサンギヤとの間に摩擦力を発生させる。そのためリングギヤに入力されたトルクはプラネタリギヤで倍力され、クラッチの伝達トルクに比例したトルクが、プラネタリキャリアを介しドライブシャフトへ出力される。この倍力機構を用いて、電磁クラッチを小型化した。

サーチコイル内蔵の電磁コイルは潤滑油に対するシール性を考慮し、樹脂モールド成形中に内部コイルの固定ピンを引き抜いて樹脂境界面を無くし、潤滑油の浸入を防止する形状とした。これによって、リアドライブユニット内の過酷な環境下でも確実に作動できる信頼性を確保した。

3.2.2. 電磁ソレノイド

ダイレクト電磁クラッチは直接クラッチに吸引力を作用する構造としたため、クラッチの磨耗によってヨークとアーマチュア間のエアギャップが変化し、電流に対するトルク特性に影響を与える。Fig. 8 に磁路形状(テーパおよびフラット)違いでの、エアギャップに対するトルク特性の実験結果を示す。磁路形状はテーパ形状を採用することで、エアギャップの変化に対し安定したトルク特性が得られた。また使用ギャップ範囲でより高い吸引力を得ることが可能となった。

Fig. 9 に磁束とトルクの関係を示す。両者に相関があるため、磁束からトルクを推定できる。

ここで磁束を測定する手法として、サーチコイルを用いる手法を開発した。具体的には規定の電流をメインコイルに流した際に、サーチコイルが発生する電圧から磁束を検出する方法である。Fig. 10 に電流と磁束およびトルクの関

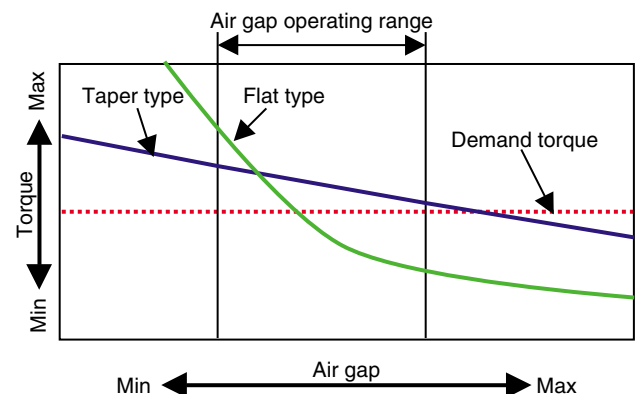


Fig. 8 Air gap-taper/flat torque characteristic

係をあらわすマップを示す。

検出した磁束に基づき、前記のマップから目標トルクに対する電流を求め電流補正することにより、異なるエアギャップにおいて目標トルクと実トルクの相関を得ることができた。Fig. 11 は電流補正なし、Fig. 12 は電流補正ありのテスト結果を示す。

3.2.3. クラッチ

トルク伝達を自在に制御するため、クラッチは常にスリップ制御をおこなっている。スリップ率は前後輪の差回

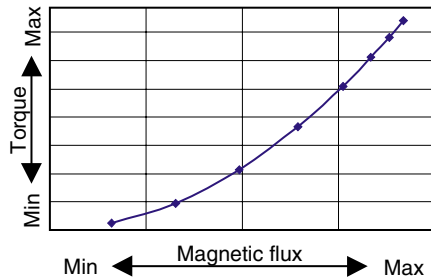


Fig. 9 Magnetic flux-torque characteristic

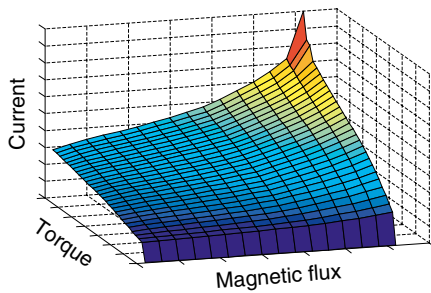


Fig. 10 Current-torque magnetic flux map

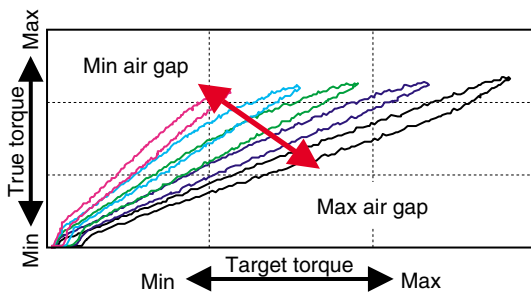


Fig. 11 Torque characteristic without magnetic flux correction

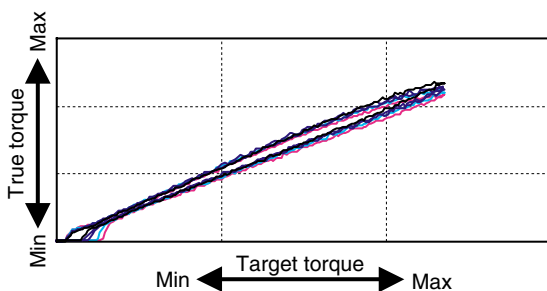


Fig. 12 Torque characteristic with magnetic flux correction

転によって決まることから、車速やタイヤのスリップ状態に影響を受ける。この場合に摩擦特性が安定していないと不快な振動が発生する。

またクラッチ磨耗に伴いヨークとアーチャ間のギャップが減少すると、両者が突き当たり吸引力の発生ができなくなる。これを回避するため十分なエアギャップを確保すると、Fig. 8 からわかるようにトルク容量が低下する。従ってクラッチには安定した摩擦特性と磨耗に対する耐久性が求められる。

安定したトルク特性を得るためには、面圧が低い領域が有利である。そこで前述の倍力機構を用いてクラッチの押し付け荷重を低減し、Fig. 13 に示すように AT や CVT に比較して低面圧領域の使用を可能とした。

Fig. 14 に吸収エネルギーとクラッチ磨耗量の関係を示す。クラッチの磨耗量が初期に多いことから、初期なじみ工程を追加し初期磨耗を低減した。

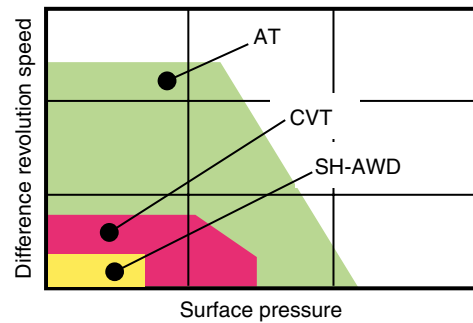


Fig. 13 Surface pressure image

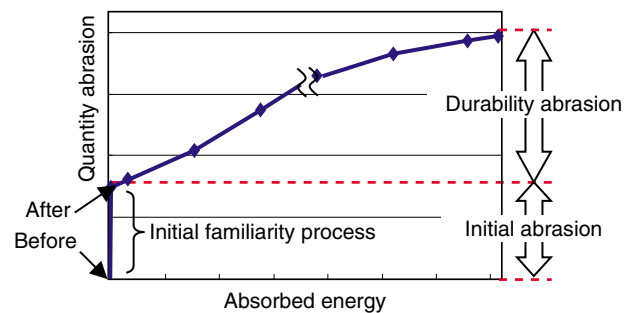


Fig. 14 Quantity of clutch durability abrasion

3.3. 増速の原理

旋回時の四輪の軌跡を Fig. 15 に示す。後輪外側の軌跡は前輪平均の軌跡より外側を通る。前輪の切れ角に対する、前輪平均と後輪外側の回転速比の関係をFig. 16に示す。旋回してすぐに前輪平均より後輪外輪が速く回転する。この状態でクラッチを圧着すると後輪外輪は減速される。つまり路面に対して抵抗となる。これを回避するため、ペラシャフトの回転を増速して後輪に伝達する必要が生じる。そのため SH-AWD では増速機構を設定した。

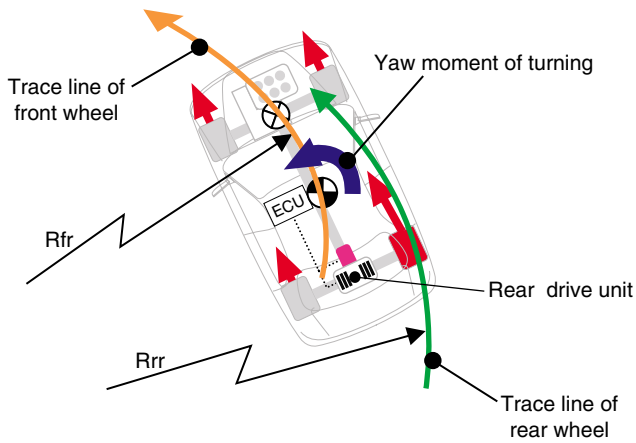


Fig. 15 Movement of vehicle in turning

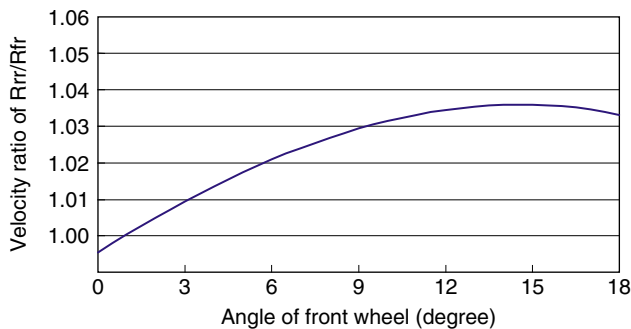


Fig. 16 Velocity ratio of rear to front wheel

3.4. 増速機構

増速機構は燃料タンクの下部に設定したため、地上高を確保できるよう小型化が必要とされた。これを実現するため、油圧アクチュエータ1個で2個のクラッチ切り替えを可能とした。また、プラネタリギヤとワンウェイクラッチおよび後進専用クラッチを採用した。

3.4.1. 構造

Fig. 17に増速機構の断面図を示す。歯数の異なる入力軸上のサンギヤと出力軸上のサンギヤ、これに各々噛合うピ

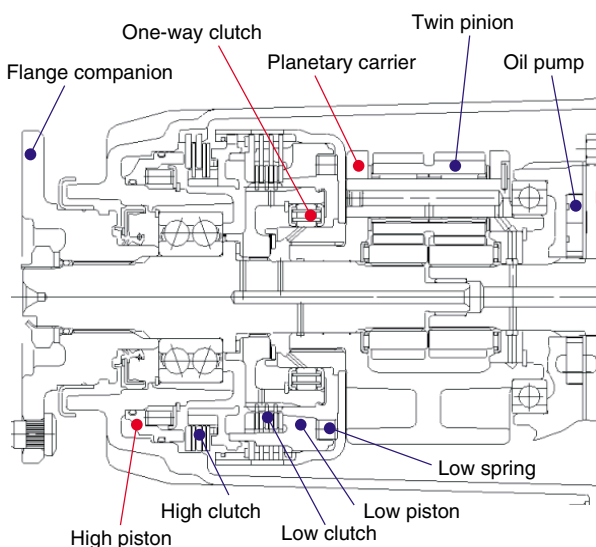


Fig. 17 Cross-section of 2speed shift unit

ニオンギヤを一体化したツインピニオン、これを保持するプラネタリキャリア、このキャリアと入力軸を結合するワンウェイクラッチ及びロッククラッチ、前記キャリアとケースを結合するハイクラッチで構成される。

直進時、ロッククラッチはローピストンを介してロースプリングに押し付けられ結合する。その結果、プラネタリキャリアと入力軸が一体で回転し直結状態となる。ピニオンギヤも自転せずキャリアと共に公転する。

旋回時、ケースに内蔵されたハイピストンは油圧によって荷重を発生し、ハイクラッチを押し付け結合させると共に、ローピストンを介してロースプリングを縮め、ロッククラッチを非結合とする。ハイクラッチが結合すると、プラネタリキャリアがケースに固定され、ピニオンギヤの公転が停まる。これに伴いピニオンギヤは入力軸上および出力軸上のサンギヤと噛合い回転を始める。この2ヶ所のギヤレシオ差が増速状態を発生する。

ワンウェイクラッチは、プラネタリキャリアが入力軸の回転を前進時に追い越さない方向に組み付けた。それにより、前進加速時にキャリアと入力軸を一体回転させるので、直結の機能を有すると共に、増速時にキャリアが固定されるのを妨げない構造とした。前進加速時の直結機能をワンウェイクラッチが受け持つので、後進および減速エンジンブレーキ用の専用クラッチが小型化できた。

3.4.2. 油圧制御系

Fig. 18 に油圧回路図を示す。

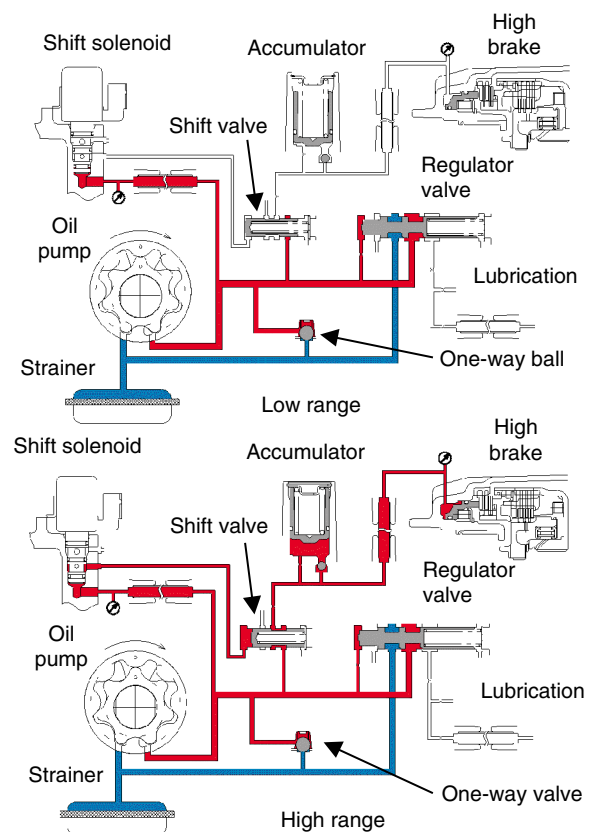


Fig. 18 Diagram of hydraulic circuit

プロペラシャフトとともに回転するオイルポンプ、ライン圧を調圧するレギュレータバルブ、クラッチ切り替え用シフトバルブ、シフトバルブを制御するソレノイド、油圧アキュムレータ、およびワンウェイ弁で構成される。

レギュレータバルブで調圧する際の排出油を潤滑油に利用した。また一定の潤滑圧に達するとオイルポンプの吸入口へ排出油を戻すことで、回路の保護と潤滑量の平準化およびオイルポンプ負荷の低減を計った。

ソレノイドは専用 ECU からの指令に基づきシフトバルブを動かし、ライン圧のクラッチ室への連通およびクラッチ室の残油排出を制御する。

ワンウェイ弁は、後進時にオイルポンプ吸入口と吐出口を連通することで、オイルポンプ逆転時の油圧回路内へのエア噛みによる正転への切り替え時の応答遅れやキャビテーション発生を防止すると共に、逆流によるストレナからのコンタミ流出を防止する。

4. 車両制御システム

4.1. 制御ロジック

Fig. 19 に SH-AWD の制御フローチャートを示す。システムの応答性を重視して、フィードフォワード制御を主体とした。フィードフォワード制御では、予め定めた車両特性に基づき制御量が決定されるため、車両特性の変化や路面等の環境変化により制御精度が低下する可能性がある。そのためフィードバック制御で補正するロジックとした。

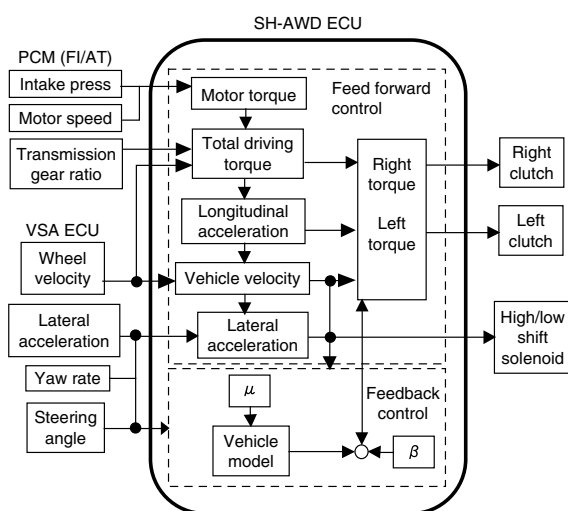


Fig. 19 Chart of control flow for SH-AWD system

4.2. フィードフォワード制御

フィードフォワード制御の制御フローを以下に述べる。

- エンジン回転数、吸気負圧等から、予め設定したトルクマップに照らしてエンジンの発生トルクを推定する。
- トランスミッションギヤ比とトルクコンバータのトルク比等から、車軸上の総駆動トルクに換算する。
- 走行速度、トランスミッションギヤ比、TH 開度等の走

行状態に応じて前後輪のトルク配分比を設定する。

- 総駆動トルクと前後輪のトルク配分比から後輪トルクを算出する。
- 後輪の平均速度と操舵角による推定横加速度と、横加速度センサ、ヨーレイトセンサから旋回量を算出する。
- 旋回量に基づき後輪左右の各駆動トルクを算出する。
- 後輪左右の各駆動トルクを電磁クラッチへの電流設定として出力する。

4.3. フィードバック制御

以下にフィードバック制御の制御フローを述べる。

- 車体モデルに基づき車体重心点におけるスリップ角を推定する。
- 旋回量に応じたスリップ角しきい値と推定スリップ角の比較から、スリップ角が大きいと判断した時に、フィードフォワード制御によって求めた後輪左右トルクの差を縮める補正量を出力する。
- 更にスリップ角の減少傾向が見られない時に、後輪へのトルク配分比を減らす補正量を出力する。

4.4. 増速制御

増速制御は旋回時のみおこなう。旋回の判断には、フィードフォワード制御によって求めた推定横加速度の絶対値を用いる。推定横加速度を用いる方法は、旋回動作をドライバの入力から予測できる点で、横加速度センサ出力を用いる場合より応答性が高い。

本システムの直結状態において、前輪平均車速と後外輪車速が等しくなる走行状態を、車速と旋回横加速度の関係として Fig. 20 に示す。Fig. 20 より増速が必要となる旋回横加速度の値は高速ほど大きくなる。従って、高速では増速指令を出力する旋回横加速度を大きく設定した。

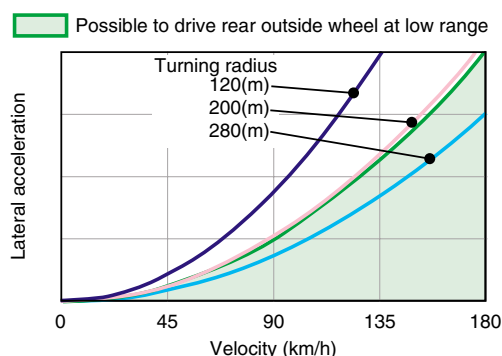


Fig. 20 Wheel speed relation at low range

5. 実車性能

SH-AWD 付き車両による走行テスト結果について述べる。本システムの効果を端的に示す事例として、加速旋回と加速スラロームを実施した。

5.1. 加速旋回特性

比較車両には前後駆動力等配分のセンターディファレンシャルを有するメカニカル常時四輪駆動の車両を用いた。Fig. 21に加速時の旋回特性を示す。極低速にて舵角と速度を一定とした基準円旋回(定常)状態から、アクセルを全開にした場合の旋回半径の広がり、基準円の半径に対する変化率を用い評価した。SH-AWD付き車両は、比較車に対して半径の増加が少なくアンダーステアが大幅に抑制された。さらに旋回可能な限界横加速度が大きく向上した。

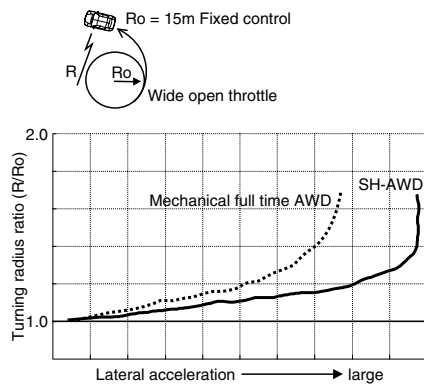


Fig. 21 Turning radius ratio against lateral acceleration

5.2. 加速スラローム

急加速中のスラローム操舵時における、操舵に対するヨーレイトの追従性を評価した。前輪駆動車の結果を Fig. 22, SH-AWD 付き車両の結果を Fig. 23 に示す。前輪駆動車の場合、連続転舵によるヨーレイトの追従性悪化、ゲインの低下が見られる。一方、SH-AWD 付き車両は追従性の向上に加え高ゲイン化によるヨーレイトの発散も抑えられ、追従性と安定性を両立することができた。(図中斜線部)

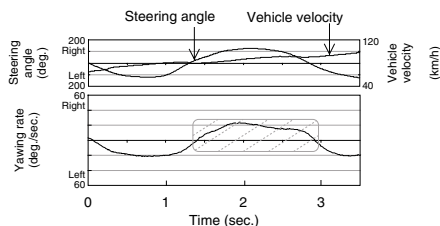


Fig. 22 Result of front wheel drive vehicle

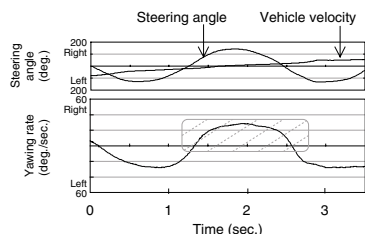


Fig. 23 Result of SH-AWD vehicle

6. まとめ

前後輪駆動力配分および後輪左右の駆動力を自在に制御することにより、ステアリング操作に忠実な旋回性能や、操

舵に対する高いヨーレイト追従性を実現できた。この結果、ドライバの意志に忠実な旋回特性となる『ニュートラルステア・フィール』を実現した。

またダイレクト電磁クラッチとサーチャコイルを用いた電流補正制御の考案により、高精度な駆動力制御を可能とした。さらに小型化した増速機構の採用により、車両への搭載性が向上し、旋回制御の領域を広げることができた。

今回の SH-AWD 開発においては、個々の技術要素についても多くの新規開発がなされた。本文ではシステム全体の紹介をおこなったが、今後、各技術要素についても機会を設け紹介していきたいと考えている。

最後に本システムの開発にあたり、多大なご支援を頂いた方々に心より感謝いたします。

参考文献

- (1) 田中俊三, 澤瀬薫, 高田桂治, 佐野喜亮, 岡部俊彦: 左右輪の駆動/制動力差を用いた車両旋回システムの開発, 三菱自動車テクニカルレビュー No.9, p.40-51 (1995)
- (2) Shibahata, Y., Shimada, K., Tomari, T.: The Improve of Vehicle Maneuverability by Direct Yaw Control, Proceedings of the Interenational Symposium on Advanced Vehicle Control, p.452-457 (1992)
- (3) 芝端康二, 栗城信晴, 北村克弘, 本多健司, 和田一浩, 梶原肇, 森淳, 桑原一好, 大熊信司: 左右駆動力配分システムの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.9, p.70-79
- (4) 島田和彦, 芝端康二: ヨーモーメントによる車両運動制御方法の評価, 自動車技術会論文集, No.25, p.122-127 (1994)

■ 著 者 ■



國井力也



岩崎明裕



渥美淑弘



森 淳