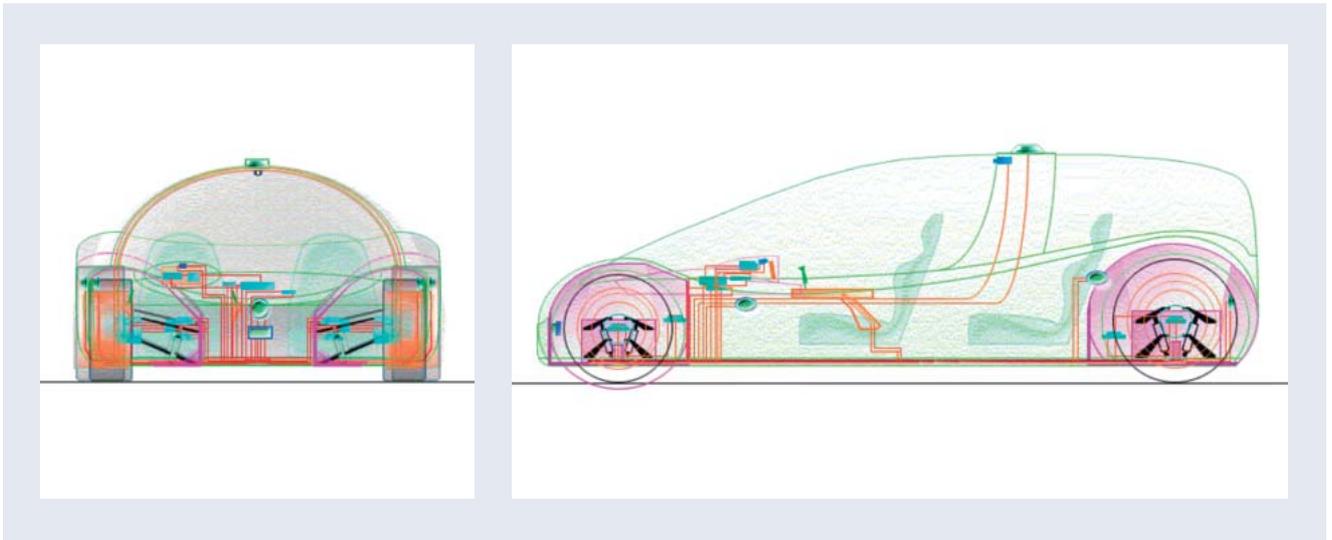


# 安全走行支援システムを支える 自動車運動制御技術

## Vehicle Dynamics Electric Control Systems for Supporting Safe Driving Systems

植木 信幸 *Nobuyuki Ueki*    高山 利男 *Toshio Takayama*    内山 正明 *Masaaki Uchiyama*  
久保 准 *Jun Kubo*    金成 逸世 *Issei Kanari*



### 将来のITS(Intelligent Transport Systems)統合制御コンセプトカーのイメージ

日立グループの X-by-Wire を搭載したコンセプトカーを示す。車両の運動性能およびレイアウトの革新を目指している。

自動車制御の分野は、ブレーキ、ステアリング、およびサスペンションの三分野に大別できる。現在、それぞれの分野が高度に専門化したため、それらを開発できるメーカーが限られてきている中で、日立グループは、これらすべての分野で高度な技術を持っている。

日立グループは、将来の自動車技術である“X-by-Wire”をキーワードに、「走る」、「曲がる」、「止まる」といった自動車のすべての性能についての技術開発に

取り組んでいる。中でも、次世代のブレーキパイワイヤ技術である電動ブレーキシステムや、これまでのシステムをいっそう進化させたSBW(Steer-by-Wire)技術は、ブレーキパイワイヤ技術とともにX-by-Wireの中核を成す技術であることから、今後も注力していく。また、運動性能や安全性を向上させるロール制御や電磁サスペンションの開発にも重点を置いている。

## 1 はじめに

1978年にダイムラーベンツ社のSクラスに世界で初めて4輪ABS(Anti-Lock Brake System)が登場してから25年が経つ。その間、車両運動の電子制御の発展には目をみはるものがある。ブレーキでは、ABS、スタビリティコントロールシステム、ブレーキパイワイヤ、ステアリングではSSPS(Speed-Sensitive Power Steering: 車速感応ステアリング)、EPS(Electric Power Steering)、サスペンションではセミアクティ

ブサスペンションやアクティブサスペンションなどが次々と実用化されてきた。さらに、各システムが標準化されるにしたがって、それぞれのシステムを連携して新たな制御を行うという研究も盛んであり、スタビリティコントロールシステムとEPSの協調制御などが実用化されてきている。日立グループは、ブレーキ制御システム、ステアリング制御システム、およびサスペンション制御システムのすべてを製造しており、それらを発展させた将来システムである“X-by-Wire”の実用化を目指して研究開発を行っている。

ここでは、X-by-Wireの主要素であるブレーキ、ステアリン

グ、サスペンション技術の現状、およびそれらの将来に向けた日立グループの取り組みについて述べる。

## 2 ブレーキ

1978年にABSが適用されて以来、ブレーキ制御機能が拡大してきている<sup>1)</sup>。近年、多くの機能が普及型車まで拡大されてきており、日立グループも、ABSやスタビリティコントロールシステムをすでに量産している。また、将来に向けてさらに高性能、高機能の製品を開発しており、それらのシステムがX-by-Wireにつながっていくと考える。

### 2.1 ABS(Anti-Lock Brake System)

株式会社日立ユニシアオートモティブは、1990年からABSを量産化し、現在まで6世代のABSを開発してきた(図1参照)。初代のLF2タイプは電子制御回路部を除いて5.9 kgであったのに対し、最新のLX4タイプは電子制御部を内蔵しながら1.59 kgと、現時点でのABSの中でトップクラスの小さく、軽質量を達成している。

### 2.2 スタビリティコントロール

ABSの次世代製品として登場したのが、スタビリティコントロールシステムである。これは、各輪のブレーキ力を制御することで車両挙動をコントロールするシステムであり、将来、シャシ技術であるX-by-Wireのベースとなる制御システムである。日立グループは、2001年にLX4-VDC(Vehicle Dynamics Control)の量産を開始した。一般的なスタビリティコントロールシステムではマスタシリンダ液圧をセンサによって検知して制御を行うのが主流であるのに対し、LX4-VDCでは、車両減速度と車輪速度から状態を推定して制御することによって液圧推定を行い、液圧センサレスシステムを実現した。これによってユニットの小型化と低コスト化を図っている(図2参照)。



図2 LX4-VDCユニットの外観

液圧センサレススタビリティコントロールユニットで油圧回路部と電子制御部を一体化している。質量は1.96 kgと軽量である。

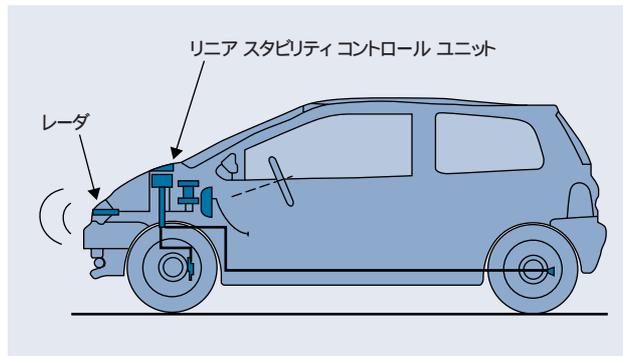


図3 ACCポンプアップシステムの仕組み

リアスタビリティコントロールユニットを用いてACCシステムを構成している。

### 2.3 リニアスタビリティコントロールシステム

ABSやスタビリティコントロールシステムではブレーキ液圧を電磁バルブのon/offでコントロールすることから、その作動に伴って多少の音や振動が発生する。日立グループが開発したリニアスタビリティコントロールシステムでは、その作動をいっそう滑らかにし、さらに広範囲で運動制御を行うことにより、作動したときの音や振動がほとんど感じられないレベルになる構成としている。具体的には、モータおよび減圧制御弁をPWM(Pulse Width Modulation)でリア制御することによって液圧制御のリニア化を実現した。リニアスタビリティコントロールシステムが持つ滑らかなブレーキ機能(ポンプアップブレーキ)により、制御ブースタに代わるACC

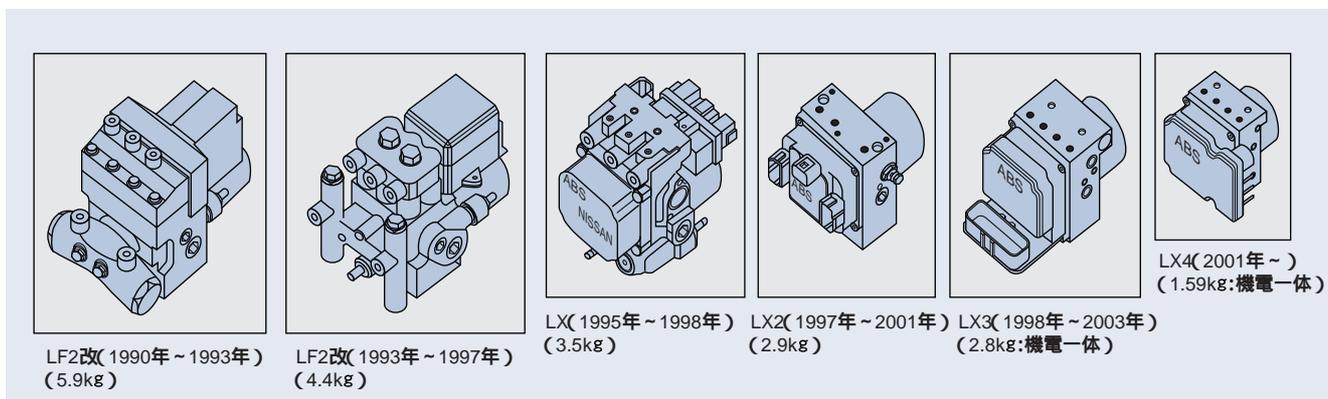


図1 日立グループのABS油圧ユニットの変遷

1990年から2004年に量産したABS用油圧ユニットの外観と質量を示す。

( Adaptive Cruise Control : 車間維持機能付き自動制御 ) システム用ブレーキアクチュエーションを低コストで提供することが可能となる( 図3参照 )。

## 2.4 電動ブレーキシステム

近年、エンジンとモータの組合せで走行するハイブリッド自動車をはじめ、低燃費化を図ったためにエンジンで発生する負圧が利用できない、あるいは十分でないという場合が多くなってきた。そのため、従来の負圧を利用したブレーキシステムでは規定の性能を十分に発揮させることができなくなっている。このような課題に対応するために、電気をコントロール源とした、いわゆる「ハイドロリック ブレーキ パイ ワイヤ」が実用化されている<sup>2)</sup>。

日立製作所、トキコ株式会社、株式会社日立ユニシアオートモティブ、および日立電線株式会社は共同で、電動ブレーキシステムを将来のブレーキシステムと見据えて開発に取り組んでいる。この電動ブレーキシステムでは、通常のブレーキ機能はもちろんのこと、ABS、スタビリティコントロール、ブレーキアシスト、インテリジェント クルーズ コントロールなどハイドロリック ブレーキ パイ ワイヤと同様に、さまざまなブレーキ制御機能のほか、ハイドロリック ブレーキ パイ ワイヤにはない、電動駐車ブレーキ機能などの新たな機能を持たせている。さらに、(1) エンジンルームや運転者の足もとスペースの拡大、(2) 対環境性の向上、(3) ブレーキ操作のフィーリングの向上、(4) ジョイスティック<sup>3)</sup>での操作など利点が多い。

電動ブレーキシステム用のアクチュエータとしては、ブレーキディスクをパッドを介して挟み込む「キャリパ」が一般的である<sup>4)5)</sup>。日立グループは、減速機構と回転・直動変換機構を独自構造とした電動キャリパを開発している( 図4参照 )。これらの仕様とモータの仕様のくふうにより、小型・軽量・低消費電力化を図ったうえで、高い応答性を確保している。そのため、停止距離の短縮や各種ブレーキ制御の効率向上が見込めることから 通常の12 Vバッテリーにも適用できるようにした。

さらに、従来のディスクブレーキ技術をはじめ、電気・電子技術、通信技術、制御技術、ワイヤハーネス技術など、電動ブレーキシステムに必要な多岐にわたる技術を日立グループ内に持っている。

## 3 パワーステアリング

パワーステアリングの二つの動力方式のうち、現在は油圧式が主流となっているが、電動式も小型車を中心に急速に普及してきている。株式会社日立ユニシアオートモティブの油圧式と電動式のパワー ステアリング システムについて以下に述べる。

### 3.1 車速感応パワーステアリング(SSPS)

油圧式パワーステアリングにも電子制御で車速に応じて操舵力を変化させる方法があり、主に高級車に採用されている。日立グループのSSPSシステムでは、通常のパワー ステアリングバルブ機構の圧力制御絞りを第2と第3に分割するとともに、車速信号による第4の絞りを設け、これを車速に応じて可変制御することにより、アシスト力を変化させて操舵力を制御する( 図5参照 )。この方式では、ポンプから供給される油の流量をむだなくシリンダに作用する圧力に変換するので、急な操舵時に応答性のよいシステムを構築することができ、バルブ機構が比較的簡素な構造で済むという利点がある。

### 3.2 電動パワーステアリング(ESP)

日立グループのEPSには、ピニオン アシスト タイプとコラムアシスト タイプがある。現在量産しているピニオンEPSのシステムは(1) 運転者のハンドル操舵力を感知するトルクセンサ、(2) その信号を演算してモータへの必要電流を供給するECU( Electronic Control Unit )、(3) 減速機を介してアシスト力をピニオン軸へ伝えるモータ、および(4) ラック アンド ピ

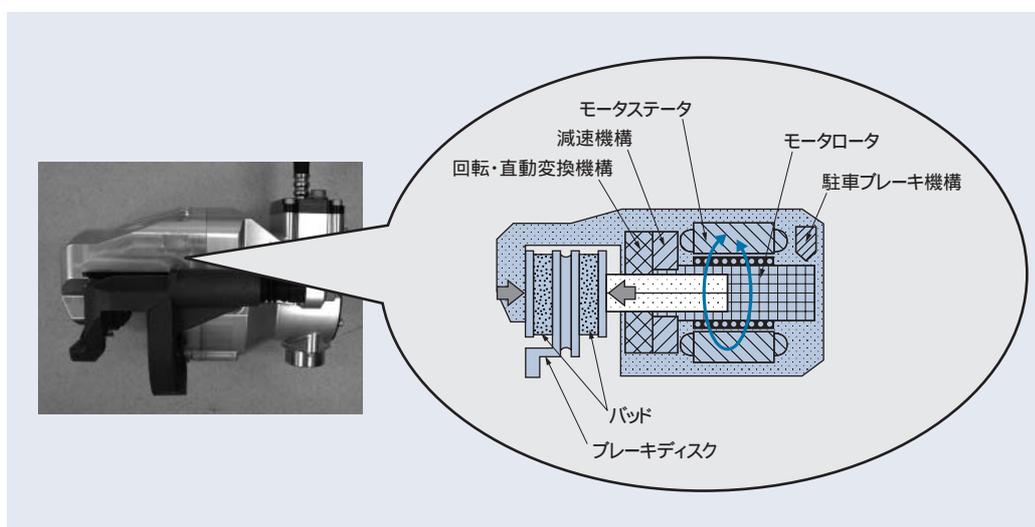


図4 電動キャリパの外観と概略構造

モータステータに通電してモータロータの回転を制御することにより、減速機構、回転・直動変換機構を介してパッドを押す力を加減し、車輪と一体のブレーキディスクの回転速度を調整する。

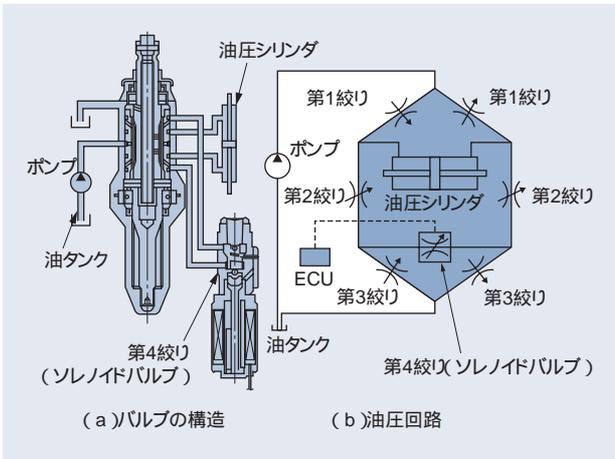


図5 SSPSの概要

通常のパワーステアリングに第2と第4の絞りを追加し、車速に応じて第4の絞りの面積を変化させることによって操舵力を変える。

ニオン式ステアリングギヤで構成している(図6参照)。ECUは車両から車速、エンジン回転数信号を受け、車速感応式EPSを構成する。また、減速機の樹脂ギヤとピニオン軸の間にトルクリミッタを配置し、路面からの過大な衝撃から樹脂ギヤを保護している。

EPSは1.5Lクラスまでの小型車用のものであるが、現在はそれ以上の中・大型車にまで対応できるEPSシステムの開発も行っている。

### 3.3 SBW(Steer-by-Wire)

前述した現在のシステム以上に高度な安全性や利便性の向上を目指したステアリングシステムとして、SBW(Steer-by-Wire)がある(図7参照)。

SBWではステアリングの操作系とタイヤを転舵するアクチュエータが分離しているため、運転者の操舵入力に対して、タイヤが実際に動く方向と速度を自由に制御することが可能となる。これにより、車両の限界挙動時の安全性や小回り時の操作量の低減による利便性が向上し、ステアリング操作系の伝達機構が簡素化される。同時に、運転席回りのデザインの自由度も向上するのがこのシステムの利点である。

また、ITS(Intelligent Transport Systems:高度道路交通システム)の一環として自動走行車両の自動操舵システムとしても用いることができるため、自動車業界や種々の研究機関で研究が進められている。

日立グループは、このような状況の中で、SBWシステムの

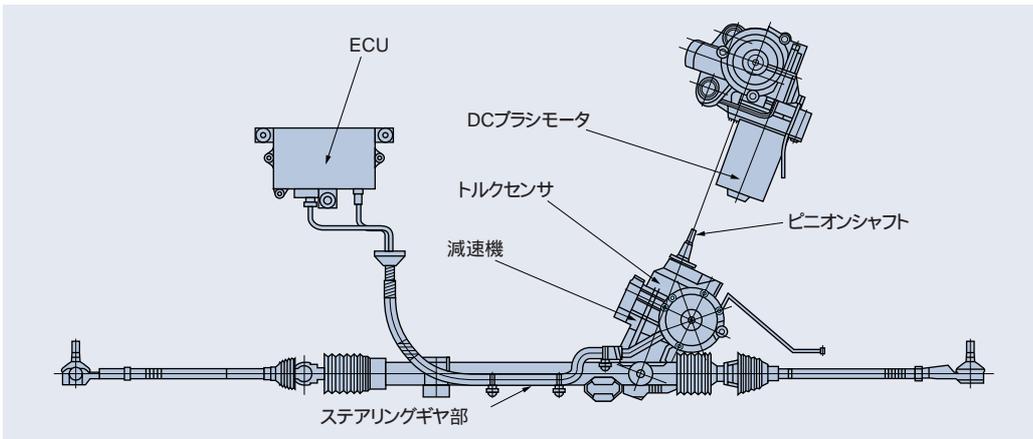


図6 EPS(電動パワーステアリング)

株式会社日立ユニシアオートモティブが現在量産している小型車用ピニオンEPSのシステム構成を示す。モータのトルクは、減速機を介してピニオンシャフトからステアリングギヤに伝達される。

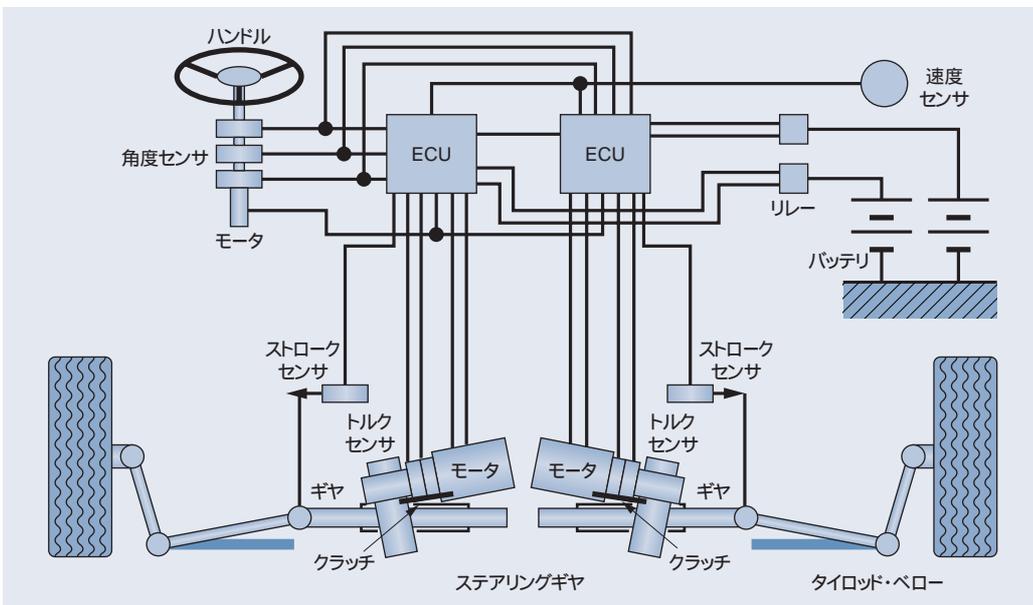


図7 SBW(Steer-by-Wire)の構成

センサ、アクチュエータ、およびECUを冗長化することで、幅広い制御性と高い安全性を確保している。

かなめである実舵アクチュエータの最適機構を中心に検討を進めている。さらに、SBWをX-by-Wireに発展させるため、ブレーキシステムと協調制御を行い、安全性と利便性を飛躍的に向上させるための研究開発も行っている。

## 4 サスペンション

### 4.1 サスペンション制御システム

自動車のサスペンションは、車体とタイヤの間に設けられたリンク機構、ばね、およびショックアブソーバ（緩衝装置）で構成する。このサスペンションは、自動車を運転する楽しさや移動手段としての快適さを決めるキーコンポーネントであり、操縦安定性、乗り心地などで評価される。一般に、自動車のサスペンションの操縦安定性と乗り心地は二律背反の関係にあることから、走る楽しさを追求したスポーツ車と快適性を追求した高級車は、それぞれどちらかの性能を優先させたサスペンション設定としている。トキコ株式会社は、制御サスペンションでこの背反する特性を高い次元で両立させるために、1980年代に電子制御式減衰力切換システムを発売して以降、アクティブサスペンションとセミアクティブサスペンションの両方を開発し、製品化してきた。

### 4.2 セミアクティブサスペンションシステム

トキコ株式会社のセミアクティブサスペンションの主なコンポーネントを図8に示す。コントローラでは、車体に取り付けた上下加速度センサの情報を基に車体の振動を検知し、これを抑制するために最適な減衰力値を演算したうえで、減衰力可変ショックアブソーバを制御して、乗り心地の向上を図る。また、ハンドル角や走行速度などの情報を基に車両の旋回運動を判断し、減衰を制御して操縦安定性の向上を図っている。

なお、このシステムの減衰力切換弁には比例ソレノイドとス



図8 セミアクティブサスペンションの主な構成機器

減衰力可変ショックアブソーバには、減衰力の切換を行う比例ソレノイドとスプール弁を用いている。

プール弁を用いており、滑らかで連続的な減衰力制御を可能にしている。

### 4.3 アクティブサスペンションシステム

特別な外部エネルギーを必要としないセミアクティブサスペンションに比べ、アクティブサスペンションは、エンジン駆動の油圧ポンプによって作り出される高圧油を用いて積極的にサスペンションを伸縮させ、車体の振動低減と旋回性能の向上を図っている。システム構成を図9に示す。高速道路でのやや急なレーンチェンジ相当となる $5 \text{ m/s}^2$ の横加速度でも、旋回中に車体が傾くロール角をほぼ0度に保てる構成としている。減衰力だけの制御であるセミアクティブサスペンションに比べ、アクティブサスペンションの優位な点である。

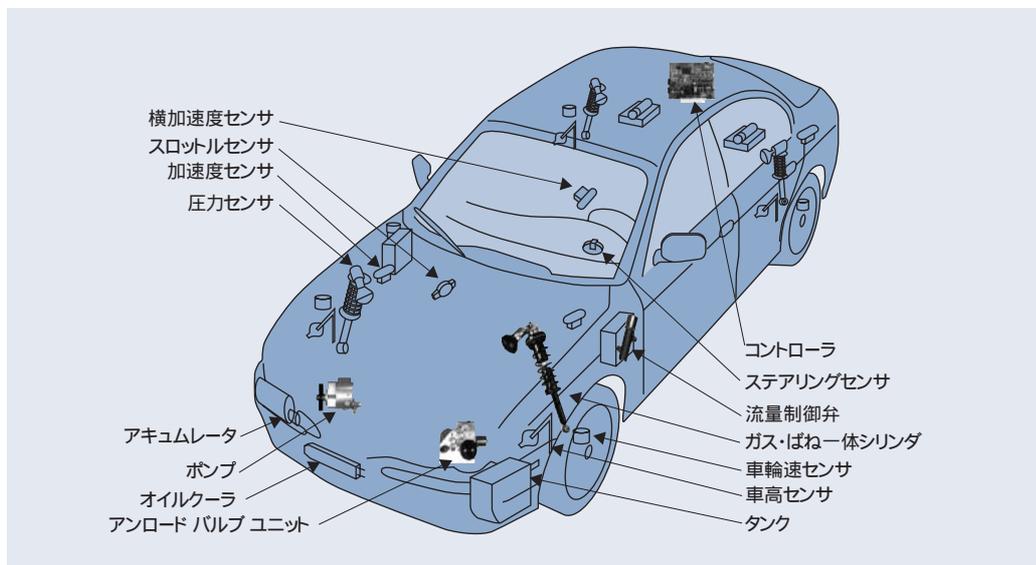


図9 アクティブサスペンションの構成

アクティブサスペンションの構成機器と車両内での配置を示す。

#### 4.4 ロール制御システム

ロール角(車体の横揺れ角)の低減に特化したシステムも製品化されており、スタビライザに何らかのくふうを加えたものが多い。代表的なものとしては、スタビライザの中心にロータリアクチュエータを設け、スタビライザを強制的にねじるシステム<sup>6)</sup>や、スタビライザの取り付け点を油圧シリンダで持ち上げて力を作用させるシステム<sup>7)</sup>がある。これらのシステムは高級車の操縦安定性を向上させるほか、重心位置の高いSUV (Sport-Utility Vehicle)車などの旋回時のロール角を低減することにも有効である。スタビライザ制御システムに用いる油圧シリンダの外観を図10に示す。

#### 4.5 電磁サスペンション

前述のサスペンション制御システムは、コンピュータやIC回路など電子技術の向上によって実現が可能となった。日立グループは、モータ技術、インバータ制御技術の進展を受け、現在、電磁気を用いた電磁サスペンションを開発している。電磁サスペンションは応答性がよく、これまでのサスペンション制御では不可能であった高周波領域まで制御することが期待されている。開発中のシステムでは、減速機を廃し、リニアモータを使うことで、ばね下からの入力を吸収しやすい構成として乗り心地の向上を図っている。

## 5 おわりに

ここでは、X-by-Wireの要素技術であるブレーキ、ステアリング、サスペンションの現状、およびそれらの将来に向けた日立グループの取り組みについて述べた。

シャシ制御については、アクチュエーションがようやく出そろったという感がある。個々のアクチュエーションが実用化され、それぞれの分野の役割を果たして自動車の性能向上などに役立ってきている。今後は、これらのアクチュエーションをいっそう効率よく安価に提供することで広く普及していくこと



図10 ロール制御用油圧シリンダの外観

ロール制御用の油圧シリンダを用いて、ロール制御を行う。

が優先課題であるが、一方、それらを用いたソフトウェア面での創造がさらに重要となってくる。

日立グループは、X-by-Wireというキーワードで将来のシャシ技術を総括しているが、ハードウェアだけにとどまらず、「モノづくり」をする立場から見た車両や車両運動性の姿などを提案していきたいと考える。

#### 参考文献など

- 1) 藤波：ブレーキ制御技術の最新線，自動車技術(2003.12)
- 2) <http://www.bosch-press.de/TBWebDB/en-US/PressText.cfm?Search=1&id=1017&SessionID=857989>
- 3) <http://www.honda.co.jp/factbook/motorshow/2001/auto/05.html>
- 4) 野口：ステアリングシステム技術動向と展望，光洋技報，No. 159 (2001)
- 5) 社団法人自動車技術会：自動車技術ハンドブック(1991.3)
- 6) <http://www.bmw.com/generic/com/en/products/automobiles/showroom/7series/sedan/index.html>
- 7) [http://www.landrover.com/gb/en/Products/Discovery/Safety\\_And\\_Security/handling.htm](http://www.landrover.com/gb/en/Products/Discovery/Safety_And_Security/handling.htm)
- 8) 内山：自動車のサスペンション制御装置，振動技術，No. 8(2003.9)

#### 執筆者紹介



植木 信幸

1999年日立製作所入社，オートモティブシステムグループマーケティング製品統括本部 シャシー製品計画部 所属  
現在，シャシ製品の企画に従事  
自動車技術会会員  
E-mail: n-ueki @ cm. jiji. hitachi. co. jp



久保 准

2002年株式会社日立ユニシアオートモティブ入社，シャシー本部 シャシー設計部 所属  
現在，制動制御システムなどの開発に従事  
自動車技術会会員  
E-mail: jun\_kubo @ hitachi-unisia. co. jp



高山 利男

1979年トキコ株式会社入社，自動車事業部 山梨工場設計部 所属  
現在，電動キャリパなどの開発に従事  
自動車技術会会員  
E-mail: takayama @ tokico. co. jp



金成 逸世

1976年株式会社日立ユニシアオートモティブ入社 シャシー本部 ステアリング設計部 所属  
現在，電動ステアリングシステムなどの開発に従事  
自動車技術会会員  
E-mail: issei\_kanari @ hitachi-unisia. co. jp



内山 正明

1987年トキコ株式会社入社，研究所 自動車機器システムグループ 所属  
現在，サスペンション制御システムの開発に従事  
日本機械学会会員，自動車技術会会員  
E-mail: uchiyama-m @ tokico. co. jp