



自動車 ステアリング機構と 鉄鋼材料

ステアリング (steering) とは「舵取り」を意味する。自動車の場合、ハンドル操作によって車輪の向きを変え、進行方向を運転者の意図するように変化させることを言う。ステアリング機構は、「車の走る機能」に対し「車を運転する機能」を担う部分であり、自動車・運転者のマン・マシン・インタフェースの中心となる。その技術動向と鉄鋼材料について紹介する。

ステアリング機構の構成と鉄鋼材料

ステアリング機構は、実際に運転者が操作するハンドルから、最終的に動きを操舵輪に伝えるまでの諸機構をいう。

内燃機関を搭載した自動車の登場以来、さまざまな機構のものが登場しているが、4輪自動車の前2輪を、円形のハンドルを使って操作する形式は、ごく初期から基本のスタイルとして定着してきた。

現在の乗用車の場合も、操舵を行うのは前輪であり、ハンドルから前輪までの仕組みは、主に図1のようになっている。

ステアリング機構は車の安全性を担う重要な部分であり、万が一の破損が人命にも関わってくるため、重要保安部品に

ステアリング機構を構成するさまざまな部品。上段左：コラムアシスト型パワーステアリングの付いたステアリング・ホイールとステアリング・コラム。上段右：ステアリング機構、パワートレーン、サスペンションが一体になったFF車の前輪部。下段：ステアリング・シャフト（中間軸）とジョイント。

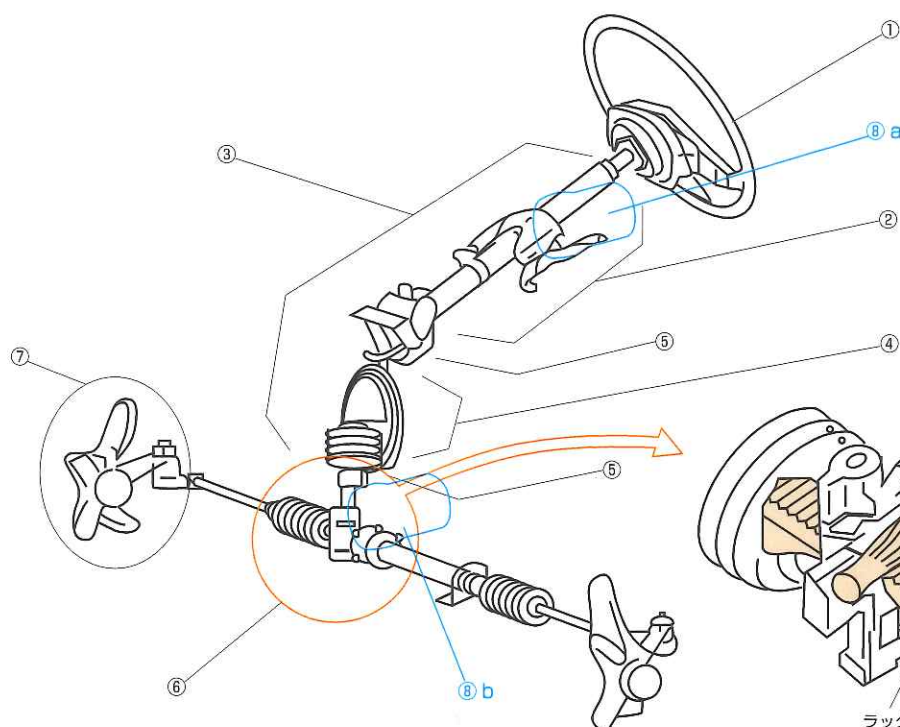
数えられている。したがって、ステアリング機構の主要構造部分には、機械構造用炭素鋼はじめクロム鋼、クロムモリブデン鋼など、高い強度や靱性を持った鉄鋼材料が使用されている。鋼種と対象部品の対応例は図2のとおりである。

また、ステアリング機構は運転者の意図のとおりには操作を伝え、さらには自動車の操作感を運転者に伝達する装置でもある。運転者のハンドル操作が意図したとおりの挙動となるかどうかのバランス、走行の直進回復の「戻り感」などの適切なフィードバックは、安全な運転にとって欠かせない。そのためにも「自然な操作感」を得られる機構設計は、非常に大切なものとなる。

ステアリング機構の進化と課題

ハンドルの回転操作を前輪の操舵角に変えるという、基本的なメカニズムの構成自体は、自動車の歴史の初期から今日まで、大きく変化はしていない。しかし、自動車の高性能化、安全性や居住性の向上など、自動車全体の進化に伴って、ステアリング機構にも不断の進化・改良が求められている。

特に近年では、運転者の操作を単に機械的に操舵輪に伝えるのではなく、自動車のインテリジェント化が進むことにより、



【図2】ステアリング機構に主に用いられる鉄鋼材料(部位別)

ステアリング機構の部位	使用鋼種および規格種類記号
ステアリング・シャフト	機械構造用炭素鋼 (SC)
ステアリング・ジョイント	機械構造用炭素鋼 (SC) 機械構造用マンガン鋼 (SMn) 等
ステアリング・ギア	クロム鋼 (SCr) クロムモリブデン鋼 (SCM) 等
ステアリング・リンク	機械構造用炭素鋼 (SC) ボロン鋼 (AS Bo) 等

特に硬度の必要なギア部（ラック、ピニオン）は、浸炭焼入れ、高周波焼入れなどの加工も行われる。

操舵制御もますます高度化する傾向にある。たとえば2003年発売モデルのトヨタ「プリウス」では、クルマ自らがステアリングを切って車庫入れ・縦列駐車を補助する「インテリジェントパーキングアシスト(IPA)」や、車輛の挙動を安定させる方向にステアリングのアシスト力を変えるシステムも搭載されている。

これらステアリング機構に関わる技術の進化や課題、開発事例などを主要なテーマに沿って述べることにする。

1. 車輛の小型軽量化と居住性・安全性の向上のため、ステアリング機構に求められる課題

自動車全体の設計の中で、軽量化は常に求められる重要なテーマである。大まかに言って、同じ車格、エンジン出力であれば、より軽量な車体をもつほうが良好な燃費性能と走行性能を得ることができる。また、同じ機能を担う部品の小型化や、強度を保ちながらの薄肉化は、省資源、省コストにもつながる。

【図1】ステアリング機構の構成

- ①ステアリング・ホイール
一般的に「ハンドル」と呼ばれる部分で、これを回転させることで、ドライバーの意図を操舵輪に伝える。
- ②ステアリング・コラム
室内側でステアリング・シャフトを内包する部分で、ステアリング・ポストとも呼ばれる。また、ステアリング機構には含まれないが、現在の乗用車ではこの部分にライトやワイパー等の操作レバーが配置される。ミニバン、タクシーなどでは運転者の腕の移動を少なくし、スペース効率も上げる意図から、ステアリング・コラムにシフトレバーを配するものも多い。
- ③ステアリング・シャフト
ステアリング・ホイールの回転をギアに伝えるロッド部分をステアリング・シャフトと呼ぶ。
- ④中間軸
ステアリング・シャフトのうち、コラム部分とギア部をつなぐ部分。操舵の回転運動を伝えるだけでなく、軸の伸縮により、衝撃・振動を吸収し、操作感・静音性を向上、また事故時の変形吸収の役割を担う。
- ⑤ステアリング・ジョイント
運転者にとって適切なシャフトおよびホイールの角度と、ギア接続部の位置は必ずしも一致しない。そのため、シャフトの中途には、角度を変更するジョイントが存在する。
- ⑥ステアリング・ギア
ステアリング・ホイールより伝わった回転運動を左右動（直線動）へと変換すると同時に、減速によりトルクを増大して、操舵輪に伝達する。変換の方式には種類があるが、現在の乗用車では小口径の歯車（ピニオン）と、直線状に歯が刻まれたロッド（ラック）を組み合わせたラック・アンド・ピニオン型が大多数となっている。
- ⑦ステアリング・リンク
ステアリング・ギアによって直線運動となった操作はタイロッドを経て、車輪のハブを保持するナックルアームを動かし、車輪の向きを変化させる。
- ⑧パワーステアリング機構
運転者のステアリング操作を補助する装置で、乗用車では主に電動式が用いられる。搭載個所により、コラムアシスト式 (a)、ピニオンアシスト式 (b) などの別がある。

一方で、居住性を向上させるため、車体寸法を広げることなく、より広い室内スペースを確保するニーズは大きく、エンジンルーム内のスペースはますます圧迫される傾向にある。

このような理由から、ステアリング機構に対しても、その小型化、特に前後長の短縮が求められている。

1.1 中間軸の短縮化・性能向上

ハンドルの回転運動をステアリング・ギアに伝えるのがステアリング・シャフト(図1-③)だが、シャフトは、運転時の振動で騒音を発生したり、不快な振動を直接ハンドルに伝えたりすることがないように、特に中間軸部分は伸縮して振動・衝撃を吸収する仕組みをもつ。この伸縮には、万一の事故時にステアリング機構が車内に突き出すことがないように、変形を吸収して安全性を確保する役目もある(図1-④)。

ステアリング機構の小型化のニーズが高まるにつれ、より短いシャフトでも従来と変わらない、あるいはそれ以上の性能を実現することが重要な課題となっている。

2 輪操舵と 4 輪操舵

現在の自動車のステアリングは、前2輪を使うのが普通であり、後輪を使ったステアリングは、

フォークリフトなど特殊用途の車輛を除きほとんど用いられない。しかし、前2輪を使った操舵は大きな内輪差や、横滑りの発生などの問題もある。

4輪すべてを操舵する4WS(4輪操舵)は、操舵性能の面からはより理想的であり、特に1980年代、日本の国産乗用車においても高級車種を中心に4WSを採用したものがいくつか発売された。しかし、機構の複雑化と高コストに加え、挙動自体は理想的でも、通常の2輪操舵に慣れた運転者にはむしろ違和感を覚えさせることもあり、現在では一般向き乗用車での採用はごく一部に止まっている。

衝撃吸収式のシャフト中間軸は、現在、主に機械構造用炭素鋼を用いて作られ、樹脂コーティングを施したテレスコピック構造として、滑りによるスライド式で伸縮するようになってるのが一般的である。

この伸縮をよりスムーズに行うため、スライド部にベアリングを仕込み、転がりと滑りによる伸縮を併せたハイブリッド式の間軸シャフトも開発されている(日本精工「ボールローラスライダ」、写真2、図3)。

ボールによる転がり構造を持つことで軸はスムーズに伸縮し、さらに与圧用ばねで抑えることで、中軸(スプライン軸)と外筒部(ハウジング)との間に従来は必要だった隙間をなくし、ガタつきを解消している。ローラがキーとして機能するため操舵に対する応答性が高いほか、大きな操舵力を伝える必要のあるコラムアシスト型の電動パワーステアリングにも対応できるという。

1.2 ステアリング・ジョイントの進化

ハンドルからの角度とステアリング・ギアの位置を合わせるため、シャフトは中途に角度変化のためのジョイントを持っている。

これには通常、2つの回転軸をもつ十字型のクロスジョイ



【写真1】 ラック・アンド・ピニオン

シャフトの回転運動はピニオンと、横軸のラックによって左右動になる。写真のラック・アンド・ピニオンはEPS(ピニオンアシスト型)が付いたもの。乗用車で一部のメーカー、車種ではピニオンアシスト型もなお使われている。

ト(カルダンジョイント)が用いられている。クロスジョイントは、回転を受ける軸の回転速度に増減(角速度変動)が生じるため、通常は2個のジョイントを角度変化に応じて軸部に差を付けて組み合わせ、互いの回転角速度変動を打ち消し合う位相に配置するダブルカルダンジョイントとすることで等速性を確保している。

しかしハンドルとステアリング・ギア間の距離短縮が進んだ結果、角度変化がより深くなり、等速性の確保を目的とするステアリングレイアウト(2つのジョイントの角度合わせ)がしにくいケースも出てくる。そこで、大角度においても角速度変動の生じない等速ボールジョイントも開発されている(NTN、写真3)。

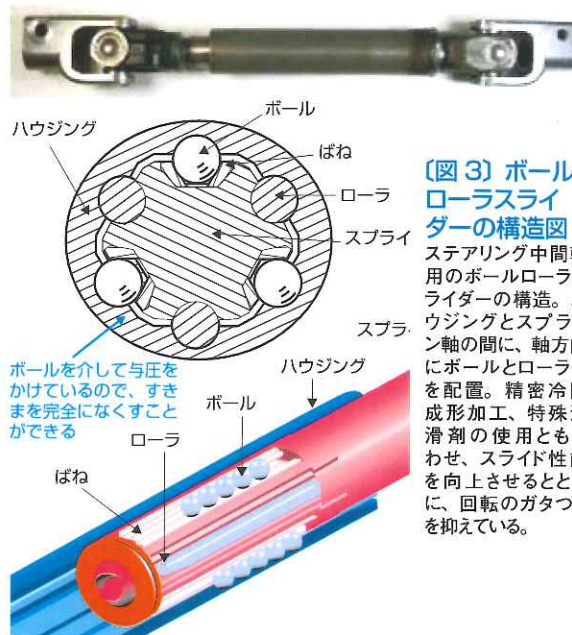
2. パワーステアリングの普及による技術開発

現在の乗用車は、FF(前輪駆動)形式が主流となっている。FR(後輪駆動)車に比べ、FF車は車体中央を駆動軸が通らず車内容積で有利、前輪により多く荷重がかかるため走行時の安定性が高い、などのメリットをもつ。このため、駆動力を滑らかに伝達できる等速ジョイントの開発・普及とともに、1960年代末以降、段階的にその割合を増やしてきた。

ただし、FF車は操舵輪である前輪に駆動軸が接続しているため、ハンドルが重く、また、旋回時にアンダーステア特性を示すなどのステアリング特性の難点があった。これを克服す

【写真2】 ステアリング・シャフト中間部

ステアリング・シャフト中間部はテレスコピック構造で振動・衝撃を吸収する。写真は転がりと滑りを併用し動作をよりスムーズにしたボールローラスライダ(日本精工)。



【図3】 ボールローラスライダの構造図

ステアリング中間軸用のボールローラスライダの構造。ハウジングとスプライン軸の間に、軸方向にボールとローラを配置。精密冷間成形加工、特殊潤滑剤の使用ともあわせ、スライド性能を向上させるとともに、回転のガタつきを抑えている。



【写真3】ステアリング・ジョイント

ステアリング・シャフトの角度変化を行うジョイント部。主にカルダン形式のもの(右2点、日本精工)が用いられるが、急角度化への対応のため、等速ボールジョイント(左、NTN)も登場している。

るため、FF車の普及とともに広がってきたのが、パワーステアリングである。

特に乗用車ではモータによって操舵を補助する電動パワーステアリング(EPS)が主流で、現在、国内の乗用車の約7割がEPSを搭載しているといわれる。EPSは動力補助を行う場所により、コラムアシスト型、ピニオンアシスト型、ラックアシスト型などに分かれる。

より車輪に近い位置にあるピニオンアシスト型やラックアシスト型は大きな力で補助するのに向くが、泥や埃、熱、振動などの点でモータの使用環境は厳しく、配線も長くなる。

コラムアシスト型は搭載位置が車内に食い込むためにモータの大型化がしづらいことなどのデメリットがあったが、モータの高出力・高効率化などによりデメリットは徐々に解消され、現在の乗用車ではコラムアシスト型が主流になりつつある。ただし、コラムアシスト型の場合、モータ搭載位置からの操舵動作の伝達系が長く、そのぶん、ステアリング・シャフト、ジョイント等構造部品の、形状や素材の改良による強度向上が課題となる。

2.1 EPS機構の小型化・一体化

小型軽量化のニーズは、EPSの機構そのものにも及ぶ。

特に現在主流となっているコラムアシスト型の場合、搭載位置は運転者の足元上部分で、直接車内容積を圧迫する。そのため、従来はそれぞれ別に取り付けられていたモータ、制

御器、トルクセンサ類をそれぞれ小型軽量化するとともに、1つのコンポーネントにまとめた「一体型EPS」も開発されている(日本精工、写真4)。

2.2 機構部材の強化

パワーステアリングは運転者の操作を軽くするが、ステアリング機構には従来の人力以上の操作動力がかかるため、機構部材の強度向上が求められる。

特に近年、小型車からより大型の車へと普及を進めているコラムアシスト型では、シャフトの入力トルクが増すために、シャフト、ジョイントの強化が必要となる。

一般的なクロスジョイントの十字の軸(スパイダ)を支えるヨーク部は、通常、熱間鍛造で作られることが多い。また小型車を中心に鉄板プレスも用いられる。ただし、鉄板プレスヨークは靱性は高いが剛性に劣り、熱間鍛造はその逆となる。

これを冷間鍛造に置き換えると、素材内の組織が微細化、連続した繊維状となり(ファイバーフロー効果)、高い剛性をも

油圧パワーステアリングと電動パワーステアリング

パワーステアリングには油圧式と電動式がある。

普及は油圧式が早く、これはハンドル操作をそのま

まオイルポンプの制御につなげることができるため自然な操作感を得られる一方、直接エンジン出力の一部が常時ポンプの作動に消費されるために燃費などの点で不利がある。

電動式は、油圧式に比べ約3～5%の燃費向上が図れるといわれる。モータ制御のためにハンドルの運動量を一度電気信号にする必要があり、初期は操作感に不自然さが目立つものもあった。またモータの性能の制約から、当初は小型車が使用の中心であった。しかしコンピュータ制御の進む現在の自動車にあって、制御の自由度も高いメリットもある。制御技術の向上により、現在では操作感の不自然さもほぼ解消、むしろ油圧式よりも優れた操作感も実現可能という。モータの高性能化も進み、現在、特に乗用車では電動式が主流となっている。



【写真4】コラムアシスト型電動パワーステアリング

コラムアシスト型パワーステアリングは、ステアリング機構上部、コラム部で動力補助を行う。小型軽量化を進めた機電一体型。手前(右)側にハンドルがつく(日本精工)。

次世代の ステアリング機構 ステア・バイ・ワイヤ

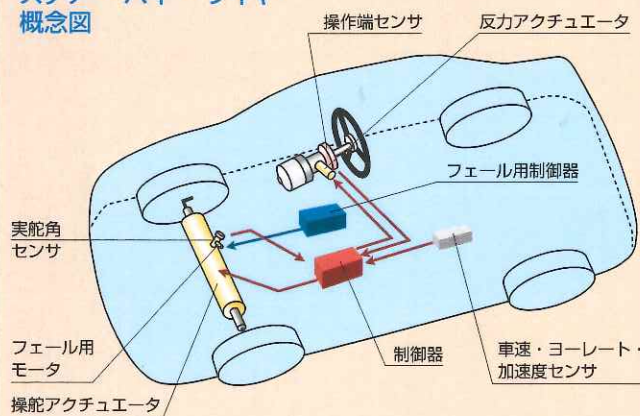
今日、パワーステアリングの機能は、単に運転者のハンドリングを補助するだけでなく、車庫入れのアシストや予防安全等の自動ステアリングな

ど、より能動的な制御も行われるようになっている。

今後も操舵輪の実際の作動に占める自動制御の割合はますます高まっていくものと考えられる。そこで次世代のステアリング機構として研究開発が進められているのが、ハンドルと操舵輪を機構的に分離した「ステア・バイ・ワイヤ」である。

ステア・バイ・ワイヤでは、ハンドル操作は一度電気信号に変換され、制御器を通じて操舵を行うアクチュエータに送られる。より高度な運転制御が行えることに加え、前輪部に直結したシャフトがないために衝突時の安全性向上、レイアウト性の向上にもつながる。

ステア・バイ・ワイヤ 概念図



ちつつ、熱間鍛造よりも靱性に優れたヨークを作成できる。こうした高強度化によりジョイント自体を小型化する技術開発も行われている。また、冷間鍛造は製造過程での精度を上げ、回転方向のガタを少なくすることで操作感の向上を図ることにもつながる。

2.3 EPSモータの高性能化

EPSの普及は、高性能のモータ開発に拠るところが大きい。

モータの小型・軽量化、高性能化は、ネオジム磁石(Nd-Fe-B磁石)の登場によって格段に進化した。ネオジム磁石はネオジム、鉄、ホウ素を主成分とし、従来のフェライト磁石に比べ、約10倍の磁力を持つとされる。ただし、ネオジム磁石に保磁力向上のための添加物として使用されているジスプロシウムは安定供給に不安があり、経済産業省の「希少金属代替材料開発プロジェクト」にも取り上げられ、その使用量削減のための研究開発が進められている。

また、特にEPS用モータの場合、高出力、高効率であるこ

とに加え、ロストルクの低さも求められるのが特徴である。

初期のEPSはハンドルの戻りが遅いなど、操作性の問題が指摘されることが多かったが、これはモータの存在によるロストルク発生に起因している。ロストルクの原因はモータ内の軸受け損、ブラシ損などの機械的摩擦のほか、ロータにおける磁気ヒステリシスによることが、近年確かめられている。

そこで、EPSのモータコア材として使用される電磁鋼板では、磁束密度向上、鉄損の低減によって出力・効率を上げるだけでなく、鋼の純度を上げ、集合組織の制御を行うなどの工夫により、ヒステリシス損を低く抑えた専用鋼板が開発されている(JFEスチール)。従来のモータ用鋼板に比べ、この高効率モータ用鋼板では、ヒステリシス損は10～20%低減されている。

また、ロストルクのうちモータ内の機械的摩擦の主要な発生源はブラシであるため、モータのDCブラシレス化も進んでいる。ブラシレス化とヒステリシス損の軽減を合わせると、さらに大幅なロストルク低減を果たすことができる。

モータ自体の高性能化・高効率化が進んだこともあり、もともとは軽自動車への搭載が主であったEPSは、現在ではより大型の2Lクラスでも一般的な存在となっている。

洗練、機構向上が求められるステアリング機構

ステアリング機構には、自動車の他の機構同様、強度の向上、軽量化に向けての厳しいニーズが向けられている。特に近年、エンジンコントロールユニット(ECU)はじめ自動車の各機能の電氣的な制御、補助の技術は急速に進んでおり、各部のメカニズムもそれに合わせた洗練、機能向上が求められている。ステアリング機構もその例に漏れない。

自動車の他の部位に使用される多くの材料同様、ステアリング機構に使用される鉄鋼材料にも、不断の高強度化・軽量化、コストの低減、加工性の向上が求められている。

さらに、技術進化にあわせ、添加元素量の工夫や製造工程の改善により、新たな素材開発も進められている。関係メーカーの技術開発は、今後もお積極的に進められていくものと考えられる。

[取材・文＝川畑英毅]

取材協力＝日本精工株式会社、JFEスチール株式会社

写真提供＝日本精工株式会社、NTN株式会社