



CVTの実用化と鉄鋼材料



エンジンが発する力を常に最適の状態に車輪に伝えるCVT（無段変速機）は、自動車技術者にとって夢の技術と言われてきた。長らく試行錯誤の段階を脱せなかったCVTだが、1987年、ようやく実用に足る金属ベルト／プーリー式CVTが登場し、普及し始めた。さらに、トロイダルCVTなど新方式も実用化され、CVTの可能性はさらに注目を集めている。

車の乗り心地や燃費の向上につながる鍵のひとつとされる、CVTの技術をレポートする。

〔左〕トロイダル型CVT。日産自動車／ジャトコ、日本精工、出光興産の共同開発により1999年登場。日産セドリック、グロリア、スカイラインなどに搭載された。（写真提供＝日本精工株式会社）

〔上〕VDT型スチールベルト式CVT。ジャトコ株式会社製、中型FF車用機種で、日産セレナ、三菱アウトランダー、ダッジキャリバーなどに搭載されている。（写真提供＝ジャトコ株式会社）

変速機役割とCVT

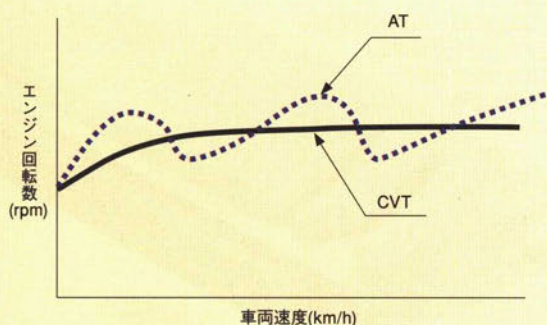
自動車が発進するとき、あるいは坂道を登るときには、車輪に大きなトルク（駆動力）が必要である。一方、平地を定速で高速走行するときには、車輪の高速回転にもかかわらず、それほどトルクを必要としない。

エンジンが発するトルクは、エンジンの回転数に関わらず、大きな変化がない。このため、大きなトルクを得るにはエンジン回転数／車輪回転数の比を高くする必要がある。また、平地を高速走行する際には、逆にその比を下げ、車輪回転数を高くすればよい。このため、エンジン回転数（入力回転数）／車輪の回転数（出力回転数）の比を、その時の車の走行状態に適したものにする装置が必要になる。それがトランスミッション（変速機）である。

自動車の登場以来、最も多く用いられてきたトランスミッ

ションは、複数のギア（歯車）を用いた方式である（多段式変速機）。これは、適宜入力側と出力側のギアの組み合わせを変えることで、変速比を変化させる。近年特に日本やアメリカではギアチェンジを自動制御し、運転者の負担を軽減する多段式オートマチックトランスミッション（多段式AT）が広く普及している。しかし多段式の場合、自動車の速度は連続的に変化するのに対し、変速比は段階的に変化する。そのたびにエンジン回転数を上下させて対応させる必要がある。このため、燃費や動力性能の上で効率のよいエンジン回転数を常に維持するわけにはいかない。また、変速の際には一度クラッチを切る必要があるため、わずかであれ、動力が伝達されない時間が発生する。変速比の変更に伴って振動（変速ショック）が起きることもある。

無段変速機（以下、CVT＝Continuously Variable Transmission、連続可変変速機とも訳される）は、変速比が



車両速度とエンジン回転数グラフ

多段式ATおよびCVTの、車両速度（車輪回転数に比例）とエンジン回転数の関係を示す。車両速度は連続的に変化するが、多段式ATは段階的に変速比が変わるため、変速の前後でエンジン回転数を変えて対応させる必要がある。

連続的に変えられるので、多段式ATの持つ問題は発生せず、ほぼエンジン回転数を最適の状態に保ったまま運転することが可能である。このため、自動車技術者にとっては理想の変速機といわれてきた。

ガソリンエンジンを搭載した、初の実用的自動車がベンツにより開発されたのは、1886年である。CVTの原理自体はそれ以前から工作機械向けなどで知られており、1907年には、すでにCVT搭載車の開発が行われている。これは多段式変速機の登場よりも早い。この後も多くの挑戦がなされ、さまざまな機構を持つCVTが登場したが、真に実用的と言えるCVTにはなかなか到達できずにいた。

多段式ATは歯車によって動力を伝達するが、CVTは、一部の例外を除いて、ほとんどが摩擦によって動力を伝達する。

油を介した金属の摩擦係数（伝達力／押し付け力）は大きくても0.1程度である。このため、ごく大まかに言えば、摩擦を用いたCVTは、歯車に比べ少なくとも10倍の力で円盤やプーリー、ベルトを押さえつけるか、あるいは円盤半径を歯車の10倍の大きさにしなければ同じトルクが伝えられないことになる。強い力で押さえつけると接触部の破損の危険性が増し、軸受け部もその力に耐えうる構造にしなければならない。一方、部品を大きくすると、変速機自体が大型化し、容積や重量の面で車載にふさわしいものではなくなる。

こうした問題点を克服して、自動車用「実用CVT」の道を切り開いたのが、1987年に登場した、オランダのファン・ドールネ（VDT社）開発によるVDT型のスチールベルト（次頁右図参照）を使ったCVTである。

VDT型金属ベルトの出現以来、世界各社でベルト式を中心にCVTの研究開発・商品化が進んでいる。その中でも特に日本は先行しており、日本国内のほとんどの自動車メーカーがCVT搭載車を発売している。

日本に比べ大排気量の車種が主で、ハイウェイを一定の高

自動車用CVT関連年表

1886年	ドイツ帝国特許局、カール・ベンツのガソリンエンジン自動車に特許を発行。前後してゴットリーブ・ダイムラーも独自のガソリンエンジン車開発に成功。
1907年	最初期のCVT搭載車登場（フリクション・ドライブ・カー）
1911年	数社からディスク型CVT登場
1925年	初期の金属チェーン／プーリー方式のCVT登場
1928～34年	米GM、トロイダルCVTを開発。金属材料、トラクションオイルの技術が未熟で量産化には至らず
1940年	米GM、本格的な多段式AT搭載車を発売
1983年	オランダ・DAF社、ゴムベルト2本を使用したCVTを商品化
1987年	VDT型金属ベルト式CVT搭載車、富士重工、欧州フォードより相次いで発売
1991年	VDT型に対抗して作られた、米ボルグワナー社のチェーン式金属ベルトCVT搭載車、スズキより発売
1995年	ホンダ、トルクコンバーターに代え、新開発の湿式多板クラッチを採用したベルト式CVT「ホンダマルチマチック」搭載車発売
1997年	日産自動車、2Lエンジンに対応可能な金属ベルト式CVTを実用化 トヨタ、「トヨタ・ハイブリッド・システム（THS）」に電気式CVTを組み合わせ、ハイブリッドカー「プリウス」に搭載
1999年	トロイダル方式CVT、日産自動車（変速機全体、制御…現・ジャヤトコ）、日本精工（変速機構部分）、出光興産（トラクションオイル）の共同開発により商品化成功

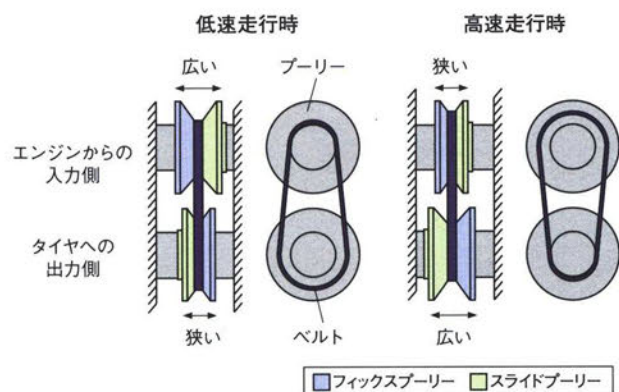
速で走る機会が多く頻繁な変速をあまり必要としないアメリカや、VDT型CVTの生まれた地でありながら自動変速自体が普及していないヨーロッパでは、CVT車の需要はまだ少ない。一方日本では、乗用車（総重量3.5t以下）の生産台数の約20%をCVT車が占め、これは今後も伸びて、2012年には30%近くになるといわれている（米CSM worldwide社による調査と予測）。

スチールベルト式CVTの機構と材料

最も実用化が進んでいるのが、V字の傾斜面を持つ入力プーリーと出力プーリーの間にベルトをかけ、プーリーのV字の幅を個別に変化させることでベルトがかかる半径を変え、変速させる方式のベルト式CVTである。

この原理を使ったCVTは1925年頃に登場しているが、実用に耐えるものとなったのは、1980年代になってからである。

1983年、オランダのDAF社がゴムベルトを使用したCVTを商品化したが、主に強度の問題から大型になりすぎ、通常の



ベルトCVTの原理

2つのプーリーにかかったベルトで動力を伝達するベルトCVT。プーリーのV字型の溝幅を広げたり狭めたりすることでベルトが巻き付く半径を連続的に変化させる。

乗用車への搭載にはあまり適さなかった。現在でもゴムベルトを使用したCVTはあるが、強度がそれほど必要とされない、小型2輪車などに使われるに留まっている。

1987年に登場し、現在もっとも一般的なVDT型スチールベルトは、エレメントと呼ばれる小さなコマと、これを繋げる薄いリングから成る。ベルトがプーリーにかかる部分でプーリーが左右から押しつける力はエレメントが支え、エレメントがプーリー外径方向に押し出される力をリングが支える。

ゴムベルト等のテンションベルトは、張り側の引っ張り力で動力を伝達するが、VDT型の金属ベルトは、主に緩み側の押力（圧縮力）で伝達する。

エレメントの材料は加工性がよく、靱性が高いことが求められ、炭素0.75%程度の工具鋼が一般的に用いられる。使用数は2Lクラスの乗用車に使われるCVTのベルトで約400枚で、CVTの大きさにより使用枚数が上下する。

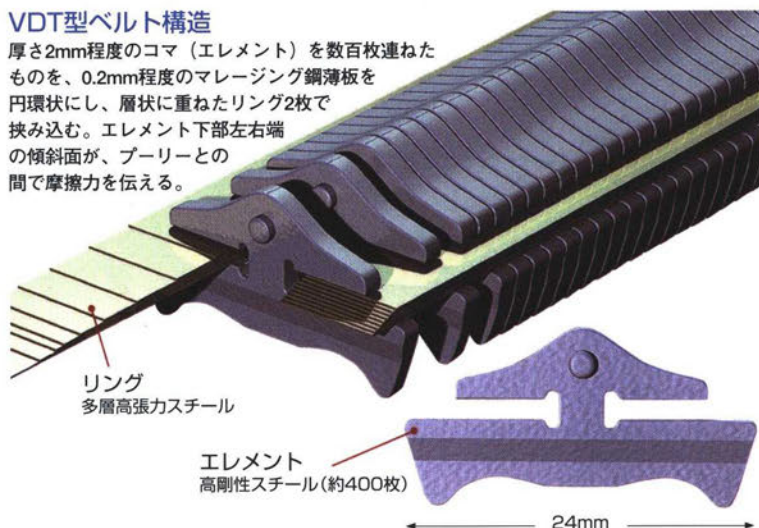
エレメントをつなぐ2組のリングは、非常に高い強度が求められる部分である。こちらは厚さ0.2mm程度の18ニッケル・マレージング鋼（18%Ni、9%Co、5%Moなど）の薄板を円環状にし、重ね合わせて使用される。重ね合わせる層の数はCVTの大きさにより9層～12層に増減する。このマレージング鋼のリングは、トランスミッションに使われる中で、最も高価な材料であるという。

プーリーは出力側、入力側の2つがあるが、それぞれベルトが巻き付く半径を連続的に変化させるため、軸に固定されたフィックスプーリーと、軸方向に移動するスライドプーリーから成る。スライドプーリーの移動に伴い、ベルトも軸方向にわずかに動くので、この時に軸の垂直線に対するベルトの傾きをなるべく小さくするため、出力側・入力側でフィックスプーリー、スライドプーリーの位置は逆に置かれる。

プーリーは、浸炭用鋼（SCr420など）で作られる。スライドプーリーはエンジンと直結したオイルポンプで圧がかけられ、ベルトを挟み込むが、この時、ベルトを噛んだプーリー

VDT型ベルト構造

厚さ2mm程度のコマ（エレメント）を数百枚連ねたものを、0.2mm程度のマレージング鋼薄板を円環状にし、層状に重ねたリング2枚で挟み込む。エレメント下部左右端の傾斜面が、プーリーとの間で摩擦力を伝える。



外側には、押し広げようとする強い曲げ応力が発生する。一方で、CVT全体の小型・軽量化には、プーリーをなるべく軽く作る必要がある。そのため、表面改質技術の改良による強度の向上、より肉薄でも強度を保てる形状の追求などにメーカーの努力が重ねられている。

同時に、ベルト、プーリーともに、素材や加工法を改良し、摩擦係数を上げることで圧力を下げ、オイルポンプ効率を向上することもさらなる燃費向上につながる重要な研究テーマとなっている。

また、VDT型以外に、金属製のチェーン式のもの、樹脂ベルトを使用したものなども登場しているが、実用化は現在のところ一部に留まっている。

トロイダル式CVTの機構と材料

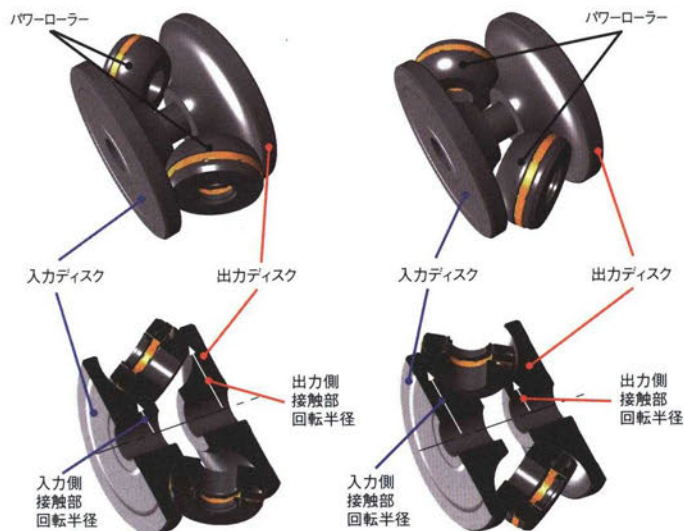
VDT型のベルト式CVTは、技術改良を経て現在ではエンジン排気量3.5Lを越す大トルク、重量車にも対応し始めているものの、主にベルトの強度上の問題から、比較的低トルクで小型軽量の自動車に向いている。また、構造上2つのプーリーを変速機の胴内に並行して配置しなければならないため変速機自体が太く短い形を持つ。この形状は、FF（フロントエンジン・フロントドライブ方式）車への搭載には問題ないが、比較的大型のセダンなどに多いFR（フロントエンジン・リアドライブ方式）車には搭載しづらい難点がある。そこで、大容量のエンジンを積んだFR車に適したものとして登場したのが、トロイダルCVTである。

トロイダルCVTは、トロイダル型（円弧を回転させた形状）のディスクを入出力双方に置き、その間にパワーローラーを挟み込んでいる。このパワーローラーの傾きが変わることで、入力側から出力側へ回転比を無段階かつスムーズに変化させて伝えることができる。

トロイダルCVTの原理自体は、1877年にアメリカで特許申

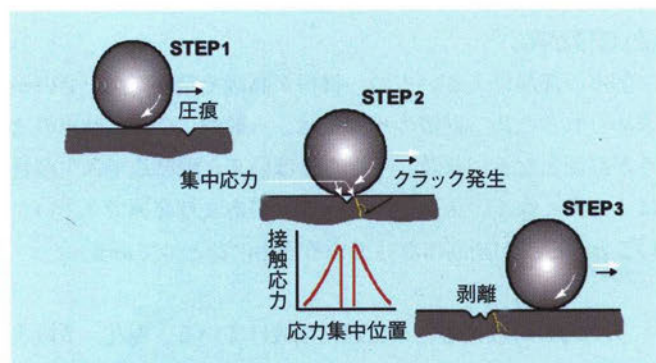
低速走行時

高速走行時



トロイダルCVT図解

円弧を回転させた形状（トロイダル型）の入力・出力ディスクを向かい合わせ、その間にパワーローラーを挟み込んだのがトロイダルCVTの基本構造。ローラーの傾きが変わることで、これと接するディスクの回転半径が増減する。なお、トロイダル型には向き合ったディスク断面が半円形のハーフトロイダル型、円形のフルトロイダル型がある（図はハーフトロイダル型）。



表面剥離のメカニズム

ディスクとローラーの間に微細な硬質異物を噛み込むと、ディスク表面に圧痕が発生する。その部分を再度ローラーが通過すると、圧痕の縁に応力が集中、剥離の原因となる。

請がなされており、ガソリンエンジンの実用車登場より古い。原理自体はシンプルであるため、変速機などへの利用が試みられてきた。しかし、トロイダルのディスクとパワーローラーにかかる大きな圧力に耐えうる材料の問題など、さまざまな技術的課題が山積み、実用化できずにいた。

これを初めて自動車用に実用レベルの製品として送り出したのは日本のメーカーであった。1999年、日産自動車（AT・CVT部門はその後分社、現ジヤトコ）、日本精工（NSK）、出光興産の共同開発により商品化された。これは同年発売の3Lターボの乗用車に搭載されたが、機構としてはより大型の4L、5Lクラスの自動車にも対応可能である。

この製品では、ディスクとパワーローラーの間にかかる押し付け力は、約20平方mm（理論状は点で接するが、弾性変形により面となる）に約5tという大きなものになっている。出光興産が中心となって開発されたトラクションオイルは、低い圧力下では潤滑油として機能するが、出入力ディスクと



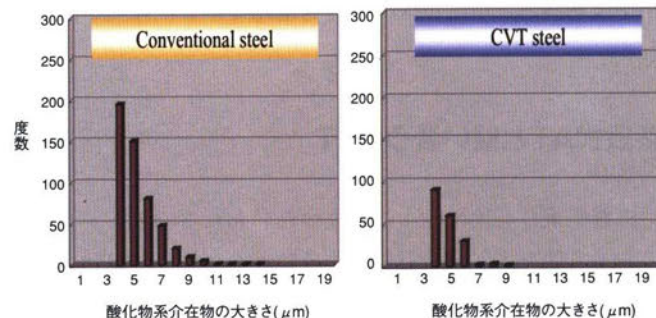
トロイダルCVTのディスクとパワーローラー

1999年に商品化されたトロイダルCVT（日産自動車、日本精工、出光興産）に使われている出入力ディスク（左）とパワーローラー（右）。



材料の破損

〔左〕表面剥離が起きた出入力ディスク。材料、表面処理技術の改良により、現在はトラクション面の剥離問題はほぼ解決した。〔右〕金属疲労による内部起点型の破損。破損は内部の非金属介在物が起点になる場合が多く、この場合、「フィッシュアイ」と呼ばれる独特の割れ模様ができる。



超高清浄度鋼と一般軸受鋼比較

サンプリングした材料表面を鏡面仕上げし、金属顕微鏡+CCDカメラ+PCからなる装置で、一定面積内の介在物を大きさ別に測定したもの。（日本精工、「NSK Technical Journal」No.669(2000)）

パワーローラーとの間で、約1/1000mmの油膜に2GPa前後の高い圧力がかかると、オイルの分子が整然と並び、絡み合っ てガラス状に固化し、強いせん断力を伝えるようになる。

開発初期には、この高い圧力のため、パワーディスク／ローラー表面の剥離や割れもしばしば起きた。初期の試作品では、走行距離1000km程度で破損する具合だったという。

この破損は、金属疲労（転がり疲れ）による内部起点型の破損と、表面起点型の剥離に大別できる。

実験により、高圧力下での転がり疲れは、金属内部に深く進行すること、材料内部の非金属介在物が破断の起点になる場合が多いことが判明した。このため、長寿命化の手法として、材料内の介在物低減が第一に図られた。軸受け鋼で養われた技術をベースとして、専用の超高清浄度鋼が新たに開発された。

一方、表面起点型の剥離は、ディスクとパワーローラーの間に油中の微細な硬質異物などを噛み込むと、それによって

ディスク表面に圧痕ができ、圧痕をローラーが通過するときにその縁に応力が集中し、クラックが生じて破損するというケースが主であった。

CVT内部の清浄度を上げて、ある程度の油汚れ、異物の噛み込みは必ず起きる。そのため、圧痕縁部の応力集中を緩和することが主対策とされ、ディスク表面を硬化する高温浸炭窒化処理を施し、残留オーステナイト量を通常の約10%より高めに設定した。これによって、圧痕が形成される際に、縁がよりなだらかになり、ローラー通過時の応力集中を減らすことができた。これによって、試作段階の1993年以降、トラクション面での剥離発生は抑えられているという。

こうして初の実用的な自動車用トロイダルCVTが誕生したが、ATと比べて高価格で、パワーローラーを支える軸受けの摩擦損失により伝達効率が低いなどの弱点もあった。このため登場以来、搭載車種は数車種にすぎなかった。しかし現在、さまざまな新機構を組み込み、低コスト化、伝達効率向上、小型化を図った第二世代の開発も進んでおり、今後が注目される。

多段式ATと競い合うCVT

燃費や乗り心地の向上に役立つといわれるCVTも、すべてにおいて他方式に勝る万能選手ではなく、将来の自動車用変速機の主役の座を巡っては、多段式ATとしてのぎを削っている状態である。改めて、CVTのメリット、デメリットを挙げ、その将来への課題を考えてみる。

● CVTの主なメリット

(1) 燃費がよい

CVTはエンジン回転数の変化の幅が狭く、エンジンの燃焼効率がよりよい状態を保てるため燃費向上が見込める。実際の燃費にはさまざまな条件が関わるため、多段式ATに比べ常にCVTが優れているとは言えない。しかし、専門誌などに掲載された自動車メーカー各社公表によれば、4段AT搭載の同級車種と比べ、「10・15モード（市街地走行に近い10パターンの走行モードに、郊外走行を想定した15のモードを加えた試験走行）」で約10%の燃費向上が認められるという。

また、変速比が連続的で、ローからハイまでより長くトルクコンバーターのロックアップが行えるので、その点でのロスも少ない。ただし、多段式ATにおいても、ロックアップはより細かな制御が行えるように改良が重ねられている。

(2) 走行性能がよい

CVTでは、エンジンの最大馬力を連続的に使って加速できる。このため、発進加速性や追い越し加速性に優れる。また、アクセルの反応も早い。

(3) 乗り心地に優れる

変速ショックがない。

(4) ハイブリッド車への適応性が高い

近年登場したハイブリッド車では、減速時のエネルギー回収を効率よく行えるという理由から、CVTと組み合わせる例も多い。

● CVTの主なデメリット

(1) トルクの伝達効率が悪い

ベルト式にしる、トロイダル式にしる、摩擦力でトルクを伝達するため、同級の車種に使われるものの場合、多段式ATに比べ、CVTのほうが重く、大きい傾向にある。同級のトランスミッションを比べると、CVTのほうが1割程度重いのが普通である。また、CVTのメリットとして「燃費のよさ」を挙げたが、もともとの回転抵抗が大きいため、変速の必要がなく一定速度で長時間走り続けるような条件下（定地走行）では、多段式ATに燃費が劣ってしまう。

(2) 値段が高い

個々の部品に大きいもの、材料が高級で精度が高いものが求められるため、同級の車種では、一般的にCVT搭載車のほうが高価となる。普及してきたとはいえ、現時点では生産量はまだまだ多くなく、スケールメリットがあまり発揮できていないこともCVTが割高になっている理由のひとつである。

多段式ATの技術も、なお進化を続けている。現在、多段式ATの主流は4～6段だが、燃費や走行性能の向上を目指してギアの段数は増える傾向にあり、8段のものも登場している。ただし、ギアの段数を増やせば、部品点数増加による重量及び製造コストが増えるから、その点では一概にCVTが不利とはいえない。

また、多段式ATのバリエーションとして、DCT（デュアル・クラッチ・トランスミッション）というものも登場している。これは奇数段のギアと偶数段のギアそれぞれに対応してクラッチが2重になっており、ギア切り替え時のラグを極力少なくしたものである。

今後も当分は、CVT、ATがそれぞれのメリットを活かして進化を続けていく状況が続くようである。

最近ではドライバーの間での燃費向上に対するニーズが強い。また日本国内では、2015年を目処により厳しい燃費規制の導入も検討されている。一般走行モードでの燃費に優れハイブリッド車への適応性も高いCVTにとってこれは追い風といえ、その技術開発、改良にはますます拍車がかかるものと予想される。

〔取材・文＝川畑英毅〕

取材協力・写真提供＝日本精工株式会社、ジャスコ株式会社