

# 自動車用無段変速機における当社での取り組み

## Koyo's Approach to Continuously Variable Transmission (CVT) for Automobile

浅野憲治 K. ASANO

*Recently, a continuously variable transmission (CVT) has widespread with rapid speed.  
It is because CVT attracts attention as a device for low-emission and low-fuel economy vehicle.  
Also CVT has a feature of smooth acceleration performance without a shifting shock.  
This paper presents the trends of CVT and a brief overview of full toroidal IVT of which Koyo has been developing.*

**Key Words:** CVT, IVT, toroidal, variator

### 1. はじめに

近年，地球環境に対する負荷低減への要求は急激に高まり，自動車メーカーでは自動車の排ガスや燃費低減等の環境対応に力を入れている．エンジンのリーンバーン化や触媒コンバータによる排ガス浄化，駆動系の効率化，小型・軽量化の追求が行なわれており，42V電源電圧の導入や小型・高効率手動変速機，自動MT，多段自動変速機，無段変速機などの技術開発が進められている．中でも無段変速機は常に最適な性能でエンジンの運転を行い，より一層の燃費向上と排ガス削減を可能とする有力な手段として注目を浴びている．機械式無段変速機（以下CVTと称す）では変速比を自由に連続して選ぶことができるためエンジン燃焼効率の最も高い最適燃費ラインに沿って運転できることとロックアップ領域の拡大を計れることが燃費向上の理由である．

一般に無段変速機と呼ばれるものは機械式，油圧式，電気式に大別され，それぞれさまざまな方式が考案されているが自動車用では機械式無段変速機が主流となっている．

本稿では自動車で用いられているCVTの動向について簡単に触れ，CVTの1つであり当社で開発を進めているIVTバリエータの概要につい

て紹介する．

### 2. CVTの動向

自動車のCVTは表1に示すように，大きく分けてベルト式とトロイダル式に分類される．ベルト式には金属ベルト式，乾式複合ベルト式およびチェーン式があり，主にエンジン排気量2.8L以下のFF車に適用されている．実用されているベルトCVTは金属ベルト式が大半を占める．

#### 2.1 ベルト式CVT

CVTが最初に自動車に実用されたのは19世紀末で，この時採用されたのがVベルト方式とされる．1958年にはオランダのDAF社がゴムベルト方式のCVT (Variomatic) を100万台以上生産したが技術的な限界とエンジンの高出力化の流れの中で十分対応することができなかった．しかし，この経験はチェーン式 (Borg Warner) や金属ベルト式 (Van Doorne) CVTの開発を触発したと言われている．Van Doorneの金属ベルトはチェーンと異なりドライブ側がフォロワ側を押して動力を伝えるいわゆるプッシュタイプベルトである．これは1987年にスバルジャスティに搭載され<sup>1)</sup>，初めて市場に投入された．その後，さらに搭載車

表1 自動車のCVT  
CVT in automobile

	ベルトCVT			トロイダルCVT	
	金属ベルト	乾式複合ベルト	チェーン	ハーフ	フル (IVT)
伝達トルク, Nm	200~250	100以下	300	380	600
発進装置	有	有	有	有	無
適用エンジン	2.5L以下	1L以下	2L	3.5L	5.5L
特徴		油圧装置不要		速度比制御	トルク制御

種を拡大し自動変速機(以下ATと称す)に占める割合は現在では10%程度にまで伸びている。この意味で1987年は本格的なCVT元年と言える。

一方、チェーン式CVTは2001年に発売されたAudi A4に搭載された<sup>2)</sup>。現在実用されている金属ベルトCVTの最大伝達トルクは250N・mで大型車への適用拡大を図るための大容量化が大きな課題となっているが、チェーン式CVTは金属ベルト式に比べてより大きなトルク容量に対応できるという可能性をもっている。

## 2.2 トロイダルCVT

トラクションドライブCVTは古くから考案されており自動車での開発は1930年代のGMでの取り組みに始まるがその実現にはトライボロジ技術、制御技術の飛躍的な進歩を待たなければならなかった。潤滑油は摩擦係数を小さくするためであるという従来の概念を覆すトラクション油の開発やEHL理論の発展<sup>3)</sup>、長寿命軸受鋼の開発<sup>4)</sup>などである。

自動車用変速機として開発されているトラクションドライブCVTはトロイダルCVTで、現在実用化されているのはハーフトロイダルCVT<sup>5)</sup>である。トロイダルとはドーナツ状の立体形状を表し、トロイダルCVTの2枚のディスクの内側にある曲面がその1部をなすことからこのような呼び名がある。図1にフルトロイダルCVTの構造例を示す。

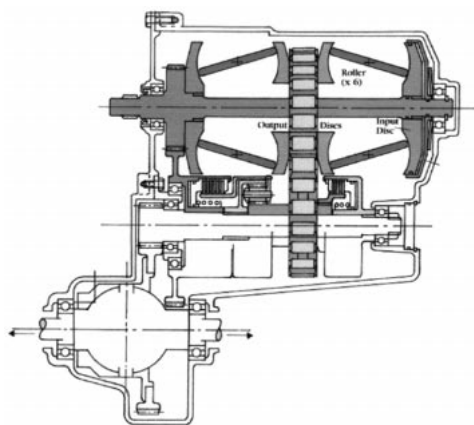


図1 フルトロイダルIVT  
Full toroidal IVT

フルトロイダルCVTの曲面はそのトロイド曲面に近いが、ハーフトロイダルの曲面はトロイド曲面の内周側1/2を切り取った形に相当する。したがって、フルトロイダルCVTでは入出力ディスクに挟まれたローラーは円板状であるのに対し、ハーフトロイダルCVTでは半球に近い形の

ローラーとなっており、ローラーがディスクから飛び出さないようにスラスト軸受で押さえつけられている。フルトロイダルではディスクとローラー接触部にスピロスがあるのに対し、ハーフトロイダルでは理論上スピロスが発生しないという違いがある。ただし、ハーフトロイダルではスラスト軸受部のトルク損失があり、トランスミッションとしての両者の効率率は総合的には同程度と考えられる。

## 3. IVTとは

遊星ギヤを利用したトルク・スプリット方式と、フルトロイダルCVTを組み合わせた無段変速機(以下IVTと称す)の開発が英国トロトラック社を中心に進められている。IVT搭載車両では、CAFEC(Corporate Average of Fuel Economy)に基づいた5速MT車との比較において1993年に平均13%の燃費改善が可能であることが報告され<sup>6)</sup>、現状は4速ATに比べて20%程度の数値が得られている。エンジンが常に効率の良い状態で回転できるようECU(エンジンコントロールユニット)が最適な変速比を選び、高い燃費性能の下での走行ができることがその理由である。また、ハーフトロイダルCVTを含めて一般にCVTは速度比制御を採用しトルコンを発進装置として必要とするのに対し、IVTはトルク制御により発進装置が不要となる。コンバータロス無くすことによる燃費改善も大きい。

IVTは非常に広範囲な変速レンジで無段変速が可能でATの1つである。通常のATでレシオ幅が4.5程度、ベルトCVTが5.8程度であるのに対し、IVTではレシオが0からオーバトップの3以上で計算上レシオ幅が無制限となる。これがIVT(Infinitely Variable Transmission)の名称の由来である。

## 4. フルトロイダルバリエータ

IVTの心臓部とも言えるフルトロイダル型バリエータの開発を当社が担当している。バリエータはダブル・キャビティで構成されており、図2のようにインプット、アウトプットディスクとローラーならびにローラーを支持する油圧ピストンで構成されている。2つのディスクに挟まれたローラーの傾き角度を自由に選択できることで滑らかな無段変速を可能とする。

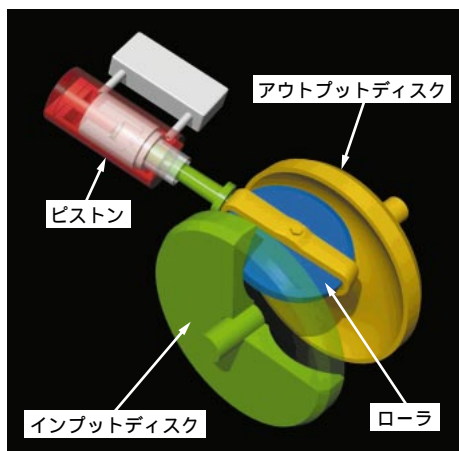


図2 フルトロイダルバリエータ  
Full toroidal variator

I V Tのドライブラインを図3に示す．図中のGはトルクスプリットギヤ，Vはバリエータ，Eは遊星歯車，LとHはクラッチを示す．トルク・スプリット・ギヤより入力されたトルクは，インプット・ディスクから6個のローラを介して1対のアウトプット・ディスクへと伝達される．ディスクには内蔵された油圧シリンダにより，ローラをクランプするためのエンド・ロードが与えられ，ディスクとローラ接触部のトラクション油のせん断力により高効率の動力伝達が行なわれる．また，ローラはトルクを伝達するトラクションによる反力を受けるため，それぞれのローラ・キャリアッジ端には油圧シリンダが設置されローラを支持する．

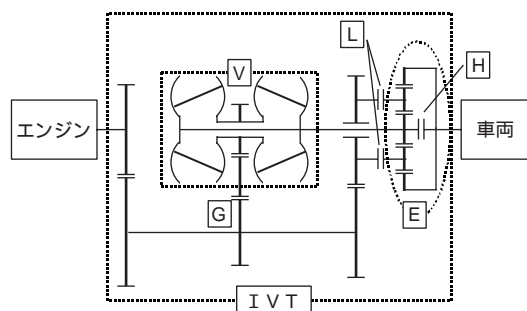


図3 I V Tの構成例  
Example of IVT configuration

#### 4.1 トラクションモデル

変速はトラクション力を利用した自律的な機構による．この機構はトルクに応じてローラの傾きを制御できるトルク制御によって初めて可能になった．バリエータには変速に対する高い応答性が求められる．ディスクとローラ接触部のすべりとトラクション係数の関係をJohnson-Tevaarwerk<sup>7)</sup>の理論を用いてモデル化，バリエータアッセンブ

リモデルへ組み込み，シミュレーションにより様々な走行状態におけるバリエータの高速追従性と安定性の検証<sup>8)</sup>を行なうことが可能となっている．ディスクとローラ接触部で起こっているダイナミックな状態を確認し，ジオメトリの最適化が計られている．図4にバリエータシミュレーション結果の1例を示す．

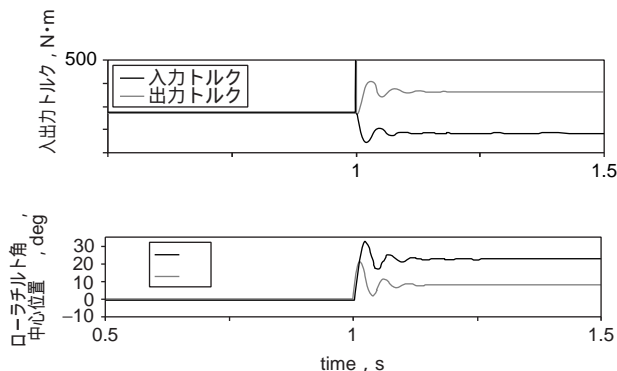


図4 ステップ応答(ディスク回転数変化)  
Step response (input disk speed 100-200rad/s)

#### 4.2 バリエータ材料

バリエータ開発には材料開発やEHL解析などのトライボロジー技術が不可欠である．特に，動力伝達を行うバリエータのディスクとローラ接触部は準高温下で1～3.5GPaに達するHertz面圧とトラクション力が作用しており，十分な耐久性が要求される．ディスクとローラの材料にはKoyoが開発したKUJ7<sup>4)</sup>が使用されている．KUJ7はM50やSKH4のような耐熱用高合金鋼に準ずる軸受鋼として開発したもので，200℃程度までの準高温域で使用が可能な安価な材料である．

従来の軸受鋼SUJ2は高温下で硬さが低下し硬さ低下とともに寿命が低下する．また，高面圧下では材料内部に発生するせん断応力の影響により組織変化が発生する場合がある．高せん断応力作用領域には図5のようなD. E. A.(Dark Etching Area)やW. B.(White Band)と呼ばれる組織変化が認められ，組織変化部を起点としてき裂が発生，はく離に至る場合がある．

KUJ7の特徴は，1) Si, Mo添加により焼戻し軟化抵抗性に優れていること，2) 炭化物の安定化(Cr, Mo添加)により準高温域での組織安定性に優れていることである．KUJ7とSUJ2の250℃焼戻し品を油温150℃の条件下で転動疲労寿命試験した試料のマイクロ組織変化の発生状況を調べた結果を図6に示す．KUJ7はSUJ2の7倍以上の応力繰り返し数まで組織変化が発生せず，組織の安定化が図られていることが分かる．参考までにKUJ7の化学成分をSUJ2と比較して表2に示す．



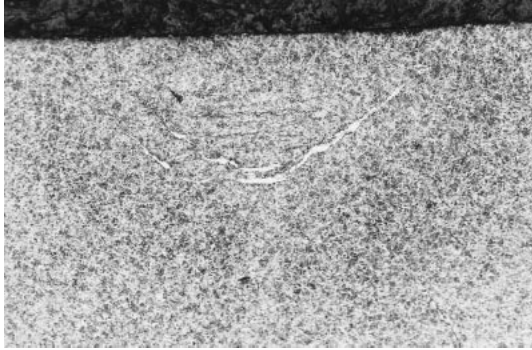


図5 D. E. A  
Dark etching area

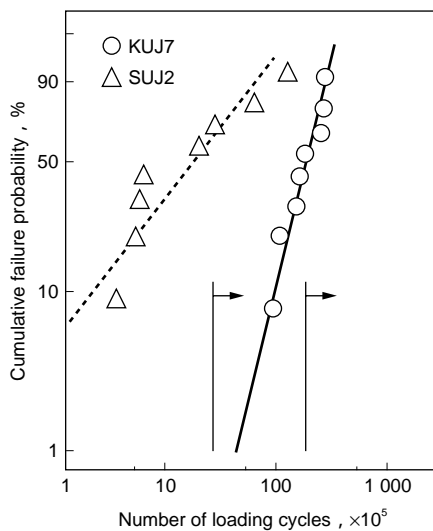


図6 組織変化の発生状況

Time-course changes of microstructure

表2 KUJ7の化学成分

Major Constituents of the steel developed

	mass%				
	C	Si	Mn	Cr	Mo
KUJ7	1	1	0.5	2	0.5
SUJ2	1	0.2	0.3	1.5	-

### 4.3 耐久寿命

KUJ7材を用いて製作されたディスク・ローラの実機アッセンブリ耐久試験結果を図7に示す。試験には動力循環式4スケアタイプのテストリグを使用し、実際のバリエータの運転条件下で試験を行なった。テストリグの外観を図8に示す。当初、耐久試験後のディスク・ローラ軌道面には表面起点型のはく離や図9に示すようなき裂が発生した。このき裂は転動体の転走痕の境界に転がり方向に対して約45°の方向を持って発生しており、通常の転がり軸受の軌道面では見られない特異な形態を示している。対策としてショットピーニングによる圧縮残留応力を付与することにより

き裂発生を防止できることが確認されている。この現象はHansonの弾性理論解を用いた応力解析によって説明され、圧縮残留応力が有効であることが理論的に検証された。図10は解析結果の1例であるが、面内せん断応力値が転走痕の中央から転走痕境界に向かうに従って応力の方向が変化し境界部で45°となり応力値も大きくなるのが分かる。表面起点型のはく離に対しては軌道面の精密加工による表面粗さの最適化により押さえられ、寿命の形態は通常の内部起点型の転がり疲労によるはく離となることが確認された。これらの表面損傷の対策に加え材料熱処理の最適化による転がり疲れ寿命の向上を計ることによって図7中の印に示すようにKUJ7製のディスクとローラは目標の耐久性を達成することが確認されている<sup>9)</sup>。しかしながら、ATやCVTと同様、IVTにおいても小型化のニーズは高く、より小さなバリエータでより大きなトルクを伝達しなければならないという課題がある。さらなる寿命向上と機械的強度向上が求められており、引続き加工技術の改良や長寿命材料開発などの取り組みを行なっている。

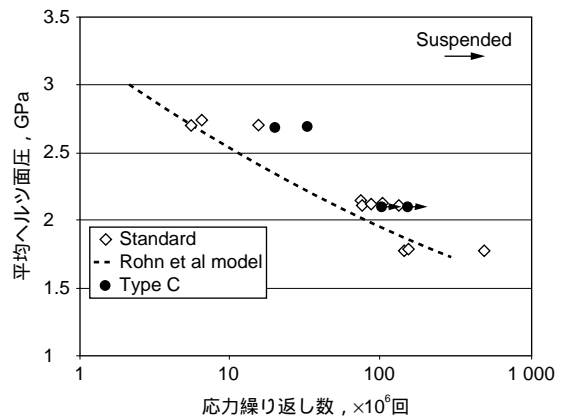


図7 S-N線図<sup>9)</sup>

S-N diagram

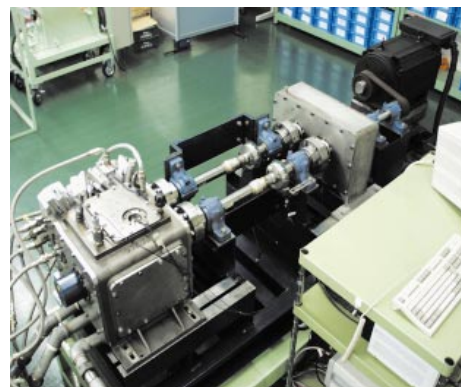


図8 実機バリエータテストリグ

Actual variator test rig



図9 特異き裂  
Surface crack

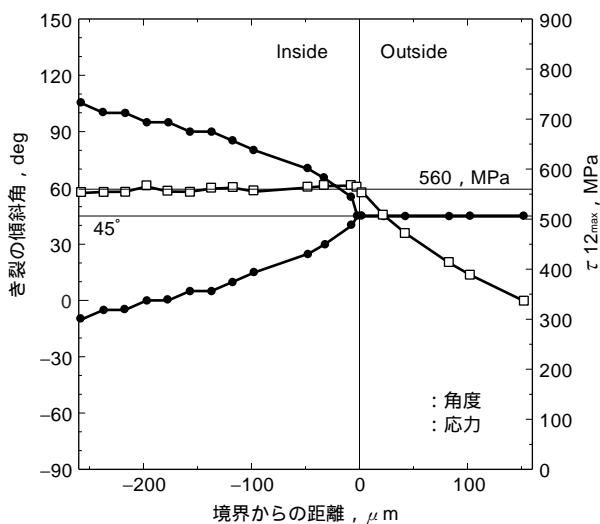


図10 応力解析結果  
Stress analysis result

5. おわりに

省エネルギー、CO<sub>2</sub>の削減に大きく寄与し滑らかな動力特性を味わうことのできるCVTの特長とIVTバリエータの開発状況について紹介した。CVT車は燃料電池車やハイブリッド車と並んで今後の自動車の中心となるという予測もある。中でもIVTは既存のCVTにはない大トルク容量で大型車への適用が可能という魅力を持っている。当社がこれまで転がり軸受開発の中で培ってきたトライボロジー技術や精密加工技術を駆使し、環境負荷低減技術の開発に精進していきたいと考える。

最後に、特異き裂の対策において理論面からご指導を頂いた大阪大学大学院基礎工学科の木田勝之助手に感謝の意を表明致します。

参考文献

- 1) 自動車年鑑，昭和62年版，日刊自動車新聞社(1987)158.
- 2) 梅野良文：自動車技術，vol. 55, no. 8 (2001) 101.
- 3) Dowson, D.：トライボロジーの歴史編集委員会訳：トライボロジーの歴史，工業調査会(1997)
- 4) 太田敦彦：Koyo Engineering Journal, no. 151 (1997) 6 .
- 5) 菅野一彦，三井田茂，川口明生他：自動車技術，vol. 54, no. 4 (2000) 55.
- 6) Smith, M. J., Hawley, M. D.：AUTOTECH '93, 1993.
- 7) Johnson, K. L. and Tevaarwerk, L. L.,：Transactions of the ASME, J. Lub. Tech., vol. 101 (1979) 266.
- 8) 蓮田康彦，Fuchs, R.：Koyo Engineering Journal, no. 160 (2001) 3 .
- 9) Lee, A., Newall, J., Ono, Y., Hoshino, T., Yasuhara, S.：SAE paper no. 2002-01-0587.

筆者



浅野憲治\*  
K. ASANO

\* 総合技術研究所 機械システム研究部